

DIE SPEKTRALEN REFLEXIONSEIGEN-
SCHAFTEN GESUNDER UND DURCH
ZYSTENNEMATODEN GESCHÄDIGTER
ZUCKERRÜBENPFLANZEN UND IHRE
ABBILDUNG AUF INFRAROT-
FARBLUFTAUFNAHMEN

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Forstwissenschaftlichen Fakultät
der Albert-Ludwigs-Universität
zu Freiburg i. Br.

vorgelegt von
ERICH SANWALD
aus
Hohebuch / Hohenlohe

1979

DIE SPEKTRALEN REFLEXIONSEIGENSCHAFTEN GESUNDER UND
DURCH ZYSTENNEMATODEN GESCHÄDIGTER ZUCKERRÜBENPFLANZEN
UND IHRE ABBILDUNG AUF INFRAROT-FARBFLUHTAUFNAHMEN

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Forstwissenschaftlichen Fakultät
der Albert-Ludwigs-Universität
zu Freiburg i.Br.

vorgelegt von
Erich Sanwald
aus
Hohebuch/Hohenlohe
1979

Dekan: Prof. Dr. R. Grammel
Leiter der Arbeit: Prof. Dr. G. Hildebrandt
Referent: Prof. Dr. G. Hildebrandt
Korreferent: Prof. Dr. W. Koch, Universität Hohenheim

Tag der Verkündigung des Prüfungsergebnisses: 19.11.1979



Meinen Eltern gewidmet



Digitized by the Internet Archive
in 2026

<u>INHALT</u>	Seite
VORWORT	1
I EINLEITUNG	3
II LITERATUR	6
II.1 Allgemeiner Überblick zur Anwendung der Fernerkundung	6
II.2 Anwendung der Luftbildtechnik im landwirtschaftlichen Pflanzenschutz	12
II.3 Grundlagenuntersuchungen	26
II.3.1 Die spektralen Reflexionseigenschaften von Pflanzenteilen (Blättern)	26
II.3.1.1 Prinzipien der Interaktion zwischen elektromagnetischer Strahlung und Blättern	29
II.3.2 Die spektralen Reflexionseigenschaften von Pflanzen im Bestand	32
II.3.3 Wertung und Schlußfolgerungen	34
II.4 Problemstellung	36
III. DER RÜBENZYSTENNEMATODE <i>HETERODERA SCHACHTII</i> SCHMIDT	39
III.1 Biologie	39
III.1.1 Systematische Eingliederung	39
III.1.2 Herkunft und geographische Verteilung	39
III.1.3 Entwicklungsbiologie	40
III.1.4 Ökologische Aspekte	41
III.1.4.1 Temperatur und Feuchtigkeit	43
III.1.4.2 Bodenart und Säuregrad	44
III.1.4.3 Wirtspflanzen, Feindpflanzen, Neutralpflanzen	45
III.1.4.3.1 Wirtspflanzen	45
III.1.4.3.2 Feindpflanzen	46
III.1.4.3.3 Neutralpflanzen	46
III.1.4.4 Faktoren, welche das Schlüpfen der Larven aus den Zysten beeinflussen	46
III.1.5 Populationsdynamik	47
III.2 Schadwirkung	49
III.2.1 Schadentstehung und Schadbild	49

III.3	Konventionelle Verfahren zur Bestimmung des Auftretens und der Populationsdichte des Rübennematozyten	51
III.3.1	Die Probenahme im Feld	52
III.3.2	Untersuchung der Bodenproben	52
III.3.2.1	Das Fenwick-Verfahren	52
III.3.2.2	Das Biotest-Verfahren	53
III.4	Fehlerquellen der konventionellen Verfahren	53
III.4.1	Fehlerquelle Bodenprobenahme	53
III.4.2	Fehlerquelle Fenwick-Verfahren	55
III.4.3	Fehlerquelle Biotest	57
III.4.4	Vergleichbarkeit und gemeinsame Nachteile beider Verfahren	57
IV	EIGENE UNTERSUCHUNGEN - MATERIAL UND METHODEN	60
IV.1	Testgebiete	60
IV.2	Arbeiten im Gelände	60
IV.2.1	Kartierungen	60
IV.2.2	Testfelder	60
IV.2.3	Bodenuntersuchungen	61
IV.2.3.1	Untersuchungen auf Nematoden	61
IV.2.3.2	Untersuchung auf Bodenfeuchtigkeit und Nährstoffe	62
IV.2.4	Beerntung der Versuchsparzellen	63
IV.3	Laborarbeiten	63
IV.3.1	Reflexionsmessungen am Spektralphotometer	63
IV.3.1.1	Gerätebeschreibung	63
IV.3.1.2	Kalibrierung und Meßvorgang	63
IV.3.1.3	Entnahme des Blattmaterials	68
IV.3.2	Bestimmung der Blattflächenindices und des Faktors R_{∞}	69
IV.3.3	Anatomische und mikroskopische Untersuchungen	70
IV.4	Befliegungen	71
IV.5	Auswertung des Bildmaterials	71
IV.5.1	Visuelle Bildinterpretation	73
IV.5.2	Gerätegestützte Bildauswertung	77
IV.5.2.1	Messungen am MacBeth-Densitometer	77
IV.5.2.2	Messungen am Mikrodensitometer	78
IV.5.2.3	Arbeiten am elektronischen Bildanalysator	82

V	EIGENE UNTERSUCHUNGEN - ERGEBNISSE UND DISKUSSION	84
V.1	Bodenuntersuchungen	84
V.1.1	Untersuchungen auf Bodenfeuchtigkeit	84
V.1.2	Untersuchungen auf Nährstoffe und Säuregrad	87
V.1.2.1	Stickstoff	87
V.1.2.2	Phosphat, Kalium, Magnesium und Säuregrad	89
V.1.3	Untersuchungen auf Nematoden	91
V.2	Spektrale Reflexionsmessungen	97
V.2.1	Turgide und nicht turgide Blätter	97
V.2.1.1	Zusammenhänge zwischen anatomischem Blatt- aufbau und spektralen Reflexionseigenschaften	103
V.2.1.2	Schlußfolgerungen und Aspekte der Reflexions- eigenschaften von Pflanzen im Bestand	106
V.2.2	Vergilbungs virus-geschädigte Blätter	110
V.3	Luftbildauswertung	110
V.3.1	Klassifikation von Zuckerrübenfeldern	110
V.3.1.1	Visuelle Interpretation	110
V.3.1.2	Densitometrische Messungen	114
V.3.2	R_{∞} und Blattflächenindex (BFI)	118
V.3.4	Interpretation von Nematodenschäden	124
V.3.4.1	Visuelle Bildauswertung	124
V.3.4.2	Densitometrische Messungen	126
V.3.4.3	Mikrodensitometrische Messungen	131
V.3.4.4	Dichteebenenentrennung und Farbcodierung am elektronischen Bildanalysator	135
VII	ZUSAMMENFASSUNG	140
	LITERATUR	144
	ANHANG I: Zusammenstellung der Resultate der Bodenunter- suchungen auf Nematoden	
	ANHANG II: Kostenrechnung	

VORWORT

Im Frühjahr 1976 berief mich Herr Professor Dr. G. Hildebrandt zur Bearbeitung eines Forschungsvorhabens an die von ihm geleitete Abteilung Luftbildmessung und -interpretation des Instituts für Forstwirtschaftliche Betriebseinrichtungen an der Universität Freiburg i.Br. Den ursprünglichen Anstoß zu der Verfolgung der Arbeitsrichtung, in deren Rahmen die vorliegende Arbeit entstand, hatte Herr Professor Dr. W. Koch, Abteilung Herbo-logie des Instituts für Phytomedizin an der Universität Hohenheim gegeben. Während der theoretischen Einarbeitung an dessen Institut und einigen Versuchen zur meßtechnischen Anwendung hatte ich Kontakt zu Herrn Prof. Dr. G. Hildebrandt aufgenommen. Über die unter seiner Leitung durchgeführten Arbeiten und deren Resultate soll hier berichtet werden.

Ich danke Herrn Professor Hildebrandt für sein freundliches Entgegenkommen, das es mir ermöglichte, praxisorientierte wissenschaftliche Forschung zu treiben und mich mit wichtigen Verfahrensweisen und Geräten vertraut zu machen. Seine hilfreichen Unterstützungen und Anregungen habe ich ebenso wie auch die stets gute Atmosphäre während meiner Arbeit bei ihm sehr geschätzt.

Herrn Professor Koch, der mich vorausschauend auf eine Fährte lenkte, deren Verfolgung mich nach anfänglichen Orientierungsschwierigkeiten schon unterwegs auf lohnende Ziele stoßen ließ (und läßt), möchte ich dafür ebenso wie für eine ständige Bereitschaft zu kritischen Diskussionen und Denkanstößen sehr herzlich danken.

Die Finanzierung durch ein Graduiertenförderungsstipendium verhalf mir zum Einstieg in die Anfangsgründe meiner Untersuchungen.

Den Firmen Pfeifer & Langen, Köln, und Süddeutsche Zucker AG, Mannheim, und deren Direktoren, den Herren Dr. K. Stiemerling und H. Wiedemann, bin ich für die Initiierung des Projektes und ihre großzügige finanzielle und ideelle Unterstützung während

der zweijährigen Projektarbeiten zu großem Dank verpflichtet.

Im Verlaufe der Feldarbeiten durfte ich mich stets auf vielfältige Hilfestellung und Beratung seitens der Herren Dr. H. Irion, Süddeutsche Zucker AG, und J. Küsters, Fa. Pfeifer & Langen, verlassen, wofür ich ihnen herzlich danken möchte.

Herr Dipl.-Forstwirt P. Reichert von der Abteilung Luftbildmessung und -interpretation führte mich in die Technik und Gerätebedienung bei der maschinengestützten Bildauswertung ein.

Herr Dipl.-Mathematiker G. Lange, seinerzeit an derselben Abteilung, komponierte ein Programmsystem zur digitalen Bildauswertung am Mikrodensitometer und zur digitalen Flächenberechnung. Geduldig erläuterte er mir dabei wichtige Einzelheiten.

Herr H. Dietze, damals ebenfalls an obengenannter Abteilung war mir ein kundiger Berater bei den mannigfachen Problemen der universitären Mittelverwaltung.

Ich möchte diesen Kollegen dafür meinen Dank aussprechen.

Für fruchtbare Diskussionen und Hinweise danke ich Herrn Dr. H. Walter, zwischenzeitlich am USDA-Institut, Weslaco, Texas, USA.

Herrn Dr. W. Branscheid, z.Zt. Gastprofessor an der Universität Montevideo, Uruguay, und Fräulein Dipl.-Biologin S. Hippe, Institut für Phytomedizin, Universität Hohenheim, danke ich für ihre Hilfestellung und Beratung bei der mikroskopischen Anatomie.

Für die Anfertigung der technischen Zeichnungen und der Reinschrift möchte ich Frau E. Zimmermann und Fräulein M. König, ebenfalls am Institut für Phytomedizin, herzlich danken.

Nicht zuletzt möchte ich diejenigen Mitarbeiter der beiden genannten Firmen erwähnen, die mich - nicht selten im Schweiße ihres Angesichtes - bei den Freilandarbeiten tatkräftig unterstützten; es gab dabei auch schöne Stunden, an die ich mich besonders gern erinnere.- Es sind dies die Herren Classen, Eben, Kröhl, Nelles, Seulen, Sprenger und Stolz. Ihnen allen sei an dieser Stelle ein herzliches Dankeschön gesagt.

I E I N L E I T U N G

Die Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Fernerkundung haben im Laufe der letzten zwanzig Jahre in erheblichem Maße zugenommen. Die damit einhergehenden Fortschritte, die anfänglich in erster Linie auf dem Sektor der Luftbildtechnik lagen, verlagerten sich mit der Entwicklung passiver und aktiver elektronischer Sensorsysteme aber schon bald auf die technologischen und mathematischen Aspekte dieser Verfahren (HILDEBRANDT 1976). Angesichts dieser Tatsache entsteht allzuleicht der Eindruck, daß das Luftbild, seine Aussagemöglichkeiten und seine Anwendbarkeit - zumindest im wissenschaftlichen Interesse - mittlerweile ausdiskutiert sei und somit der Vergangenheit angehört.

Dies ist nicht der Fall. So wird beständig an der Herstellung neuer Luftbildfilme mit verbesserter geometrischer und spektraler Auflösung, höherer Lichtempfindlichkeit und steilerer Gradation gearbeitet, neue Linsensysteme für die Aufnahmekammer werden berechnet und geprüft, und auch auf dem Sektor der Kammermechanik und -elektronik sowie der Bildflugnavigationshilfen ist die Entwicklung noch längst nicht abgeschlossen. In zahlreichen Anwendungsbereichen werden Luftaufnahmen in zunehmendem Maße und wachsender Vielseitigkeit eingesetzt, man denke hierbei nur an Geologie, Hydrologie, Forstwissenschaft und das Städte- und Siedlungswesen, um ein paar Beispiele zu nennen. Auch in dem für die nächste Zukunft geplanten Spacelab-Projekt wird eine Reihenmeßkammer mitgeflogen werden, um die Möglichkeiten der fotografischen und photogrammetrischen Erderkundung aus Satelliten zu untersuchen. Selbst auf dem ältesten und meistbearbeiteten Anwendungsgebiet der Luftbildfotografie, der Photogrammetrie, werden immer noch neue Forschungsergebnisse erzielt; in erster Linie hinsichtlich der Entwicklung automatisierter Vermessungs- und Ausgleichungsrechnungen auf digitaler Basis.

Im Aufgabenbereich der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion wurde im Laufe der Zeit ebenfalls der Nutzen des Luftbildeinsatzes zur Unterstützung bei verschiedenen Arbeiten erkannt. Im Gefolge einschlägiger Untersuchungen ist seine praktische Anwendung insbesondere bei Maßnahmen der Flurbereinigung, Nutzungsflächenkartierung und Erfassung der Strukturierung der Bodenoberfläche inzwischen zu-

ehends ausgedehnt worden.

ufgrund ihrer im Vergleich zu gesunden Pflanzen veränderten spektralen Reflexionseigenschaften können geschädigte Pflanzen aus Fernerkundungsaufzeichnungen erkannt werden. Da diese Änderungen jedoch in vielen Fällen unspezifisch, d.h. nicht ursächlich mit der Art des jeweiligen Schadens verknüpft sind, ist bei einer gegebenen Aufgabenstellung zu untersuchen, ob und bis zu welcher Genauigkeit eine Ansprache der Schädigung möglich ist. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn die Forliden einer bestimmten Schadursache eindeutig interpretierbar sein sollen, um ein praktikables Verfahren zur großräumigen Schadeninventarisierung zu entwickeln.

emzufolge sollte bei der Durchführung einer solchen Aufgabe die gesamte Kette der Einzelfaktoren, welche schließlich eine bestimmte Änderung der Abbildungscharakteristik bewirken, untersucht werden. In diese Studien müssen sowohl die biologischen Grundlagen der Schadenentstehung und des verursachenden Prinzips, die Vermehrung und Ausbreitung im Bestand, die Wirkung auf oberirdische, unmittelbar an der spektralen Charakteristik beteiligten Organe und deren Aufbau berücksichtigt werden, als auch die physikalisch-optischen Parameter der Abbildungsentstehung und deren Interpretation.

ur auf der Basis einer dergestalt in sich geschlossenen Erforschung von Ursache und Wirkung kann ein sicheres Verfahren zur Inventarisierung des Auftretens und der Verbreitung eines pflanzenschädigenden Organismus erstellt werden. Eine solche Methode ist besonders nützlich, wenn mit ihrer Hilfe ein bestimmter, in einer wichtigen Feldfrucht auftretender Schaderreger großer ökologischer und wirtschaftlicher Bedeutung erfaßt werden soll. Anhand der damit erhaltenen Daten ist es möglich, Hinweise auf gezielte Gegenmaßnahmen abzuleiten. Damit wird eine unverhältnismäßig hohe Belastung der Umwelt mit Chemikalien vermieden, und zugleich kann eine bessere Wirtschaftlichkeit bei der Durchführung solcher Gegenmaßnahmen erzielt werden. Ohnehin sind die Verfahren des landwirtschaftlichen Pflanzenschutzes während der letzten Zeit in der breiten Öffentlichkeit - leider nicht immer auf sachkundiger Basis - kritisiert worden. Ein im wesentlichen gerechtfertigter Gegenstand dieser Kritik ist die Vorgehensweise bei der Applikation von chemischen Pflanzenschutzmit-

teln, d.h. die ganzflächige chemische Bekämpfung phytopathogener und phytophager Organismen in Kulturpflanzenbeständen, ohne im Einzelfall ausreichend Kenntnis über die Sicherheit eines Befallsauftretens zu haben (Präventivmaßnahmen), oder ohne die Verteilung des Befalls im Bestand und damit die Möglichkeit einer Reduktion der Behandlung auf Teilflächen zu überblicken.

In der vorliegenden Arbeit soll aufgezeigt werden, wie mit Untersuchungen nach der beschriebenen Vorgehensweise die Möglichkeiten der Luftbildfotografie zur Inventarisierung von Schadwirkungen in Zuckerrüben, die durch den Rübenzystennematoden *Heterodera schachtii* Schmidt verursacht werden, erforscht und beurteilt werden können.

II L I T E R A T U R

II.1 Allgemeiner Überblick zur Anwendung der Fernerkundung in der Landwirtschaft

Eine erschöpfende historische Betrachtung dieses Themas ist vergleichsweise schwierig, denn im älteren Schrifttum zur Anwendung von Luftbildaufnahmen werden landwirtschaftliche Aspekte, welche sicherlich hier und da bei den Auswertarbeiten mit einbezogen werden, nicht gesondert erwähnt, wenn photogrammetrische, geologische oder militärische Zielsetzungen im Vordergrund des Interesses standen.

Um die vermutlich erste Anregung zur Anwendung der Fernerkundung auf dem Gebiet der pflanzlichen Landnutzung in dieses Kapitel einzubeziehen, müssen wir einen kurzen Blick in die Forstwissenschaften werfen: ein unbekannter deutscher Forstmann machte in einem Artikel im Berliner Tageblatt anno 1887 den Vorschlag, die Inventur des Baumbestandes von Waldflächen mit Hilfe der Ballon-Fotografie durchzuführen (ANONYM 1887, HILDEBRANDT 1974). Ein in der Arbeit HILDEBRANDTs (1974) enthaltenes Luftbild aus dem Jahre 1887, welches einen Teil des Dorfes Zehdenick bei Berlin mit seinen bäuerlichen Anwesen und den angrenzenden Weide- und Feldflächen zeigt, ist wohl die älteste bekannte Luftaufnahme mit landwirtschaftlichem Inhalt.

Auf dem Agrarsektor setzte erst nach dem Ende des Ersten Weltkrieges die Nutzung des Luftbildes ein. Inzwischen war die Reihenmeßkammer entwickelt sowie Filmmaterial und optische Systeme verbessert worden.

Die Vielzahl der Einsatzmöglichkeiten ist in Tabelle 1 zusammengefaßt. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, werden sich die folgenden Ausführungen auf die Anwendung fotografischer Sensoren beschränken. Hinsichtlich technischer Einzelheiten, wie der Beschreibung des Filmmaterials, der Farbenlehre, der Charakteristiken von Kammerobjektiven sowie des Aufbaus und der Funktion einer Reihenmeßkammer soll auf Arbeiten verwiesen werden, welche diese Punkte eingehend abhandeln. Neben den einschlägigen Lehrbüchern von SPURR (1960), COLWELL (1974), SCHNEIDER (1974) und SCHANDA (1976) sowie Nachschlagewerken wie Manual of Photographic Interpretation (1960), Manual of Photogrammetry (1966), Manual of

Tab. 1: Mögliche Anwendungsbereiche der Fernerkundung in der Landwirtschaft

Allgemein	Pflanzenproduktion	Pflanzenschäden	Extensive Landnutzung	Tierproduktion
Flurbereinigung	Kulturartenklassifizierung	Allg. Pflanzenzustand	Vegetationsklassifizierung	Bestandeszählung bzw. -schätzung
Kartenfortführung	Bodenklassifizierung	Starke Verunkrautung	Abgrenzung von Wald- und Buschland	(Rinder, Schweine, Schafe, Geflügel)
Landnutzungs-kartierung	Anbauflächen	Nematodenschäden	Vegetationszustand	Habitatbeschreibung
Ländliche Besiedlungsstruktur	Bestandesdichte	Insektenbefall	Nutzungsmöglichkeiten (Viehhaltung)	flächenmäßige Verteilung der Tiere
Ländliche Wegenetze	Reifezustand	Krankheitsbefall	Futterertrag	Nahrungsverfügbarkeit
Bodentypen	Zuwachsraten	Frostschäden	Zuwachsraten	Kranke u. tote Tiere
Wasservorkommen	Ertragsvorhersagen	Trockenschäden	Veränderungen im Jahresablauf	Alters- und Geschlechterverhältnis
Landw. Bauwesen	Ernteschätzung	Salzschäden	Entwicklungsmöglichkeiten	Tierverhalten
	Sä- u. Pflanzdaten	Mangelerscheinungen	Wasservorräte	Hitzeentwicklung in Silos u.ä.
	Erntedaten	ungleichmäßige Düngung	Wasserqualität	
	Bodenfruchtbarkeit	Staunässe	Erosion	
	Bodenfeuchtigkeit	Flut- u. Sturmwarnung	Feuerüberwachung	
	Wasserbedarf	Schäden durch Säugetiere	Zufahrtswege	
	Wasserqualität	Allg. Schadinventur	Umsäunungen	
	Nutzen v. Bewässerungsmaßnahmen		Wildbestand	
	Düngemaßnahmen		Bodenfruchtbarkeit	
	Gewässer- u. Kanalnetz		Bodenfeuchtigkeit	
	Wasserverfügbarkeit		Schadwirkungen allg.	

Aerial Colour Photography (1968) und Manual of Remote Sensing (1975) ist insbesondere auf die Arbeiten von STEINER (1962), MEIENBERG (1966), KENNEWEG (1972), SCHOEDLER (1973), TZSCHUPKE (1974) und ROHDE (1977) hinzuweisen.

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, basiert die Mehrzahl der Anwendungsmöglichkeiten des Luftbildes in der pflanzlichen Erzeugung auf der Interpretation der Vegetation, d.h. auf der Klassifikation der Feldfrüchte einschließlich der Ansprache ihres Zustandes)¹. Aus solchen Auswertungen kann eine Vielfalt an Informationen gewonnen werden. Dabei stehen - insbesondere aus wirtschaftspolitischer und sozioökonomischer Sicht - Landnutzungserhebungen im Vordergrund. Sie dienen einmal zur Inventarisierung der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche und der Gesamtfläche einzelner Anbaukulturen, und zum anderen zur Feststellung der geographischen Verteilung von Kulturarten und Flächengrößen. Aus diesen Daten können wiederum vielfältige Rückschlüsse gezogen und Empfehlungen ausgesprochen werden.

Neben den USA, Kanada und Großbritannien (BOURNE 1937) setzte auch die UdSSR gegen Ende der Zwanziger Jahre das Luftbild zur großräumigen Flächennutzungskartierung und zur Erschließung neuer Areale ein (n. SCHNEIDER 1974). In Deutschland war es TROLL, der Begründer der Landschaftsökologie, der als erster den Wert dieser Technik erkannte und in bahnbrechenden Arbeiten darstellte (TROLL 1939 und 1943). Um diese Zeit erschienen auch die ersten zusammenfassenden Werke zur Luftbildinterpretation (BAGLEY 1941, EARDLEY 1941), in denen einige Schwerpunkte auf die Erfassung der Vegetation gelegt wurden. Nach dem Ende des Zweiten Weltkrieges wurde im Rahmen rasch zunehmender Forschungsintensitäten auf dem Gebiet der zivilen Fernerkundung zahlreiche Studien über die Grundlagen der Abbildung landwirtschaftlicher Pflanzenbestände auf Luftaufnahmen durchgeführt (ALDRICH 1953, HILDEBRANDT 1957, BRUNNSCHWEILER 1957, GOODMAN 1959, BROMBERGER & DILL 1960,

)¹ Auf photogrammetrische Auswertungen, wie sie im Rahmen der Flurbereinigung etc. vorgenommen werden, kann hier nicht näher eingegangen werden.

STEINER 1961, 1962 und 1971, STEINER et al. 1966, MEIENBERG 1966, RUPPERT & MEIENBERG 1964) und Hinweise zur Bildauswertung - auch mit Blickrichtung auf eine mögliche Automatisierung - gegeben (FLYNN et al. 1965, MAURER 1965, ANSON 1966, ANDERSON 1971, SCHOEDLER 1973). Mehr ökologisch ausgerichtete Autoren befassen sich mit den phänologischen Wandlungen landwirtschaftlicher Pflanzenbestände in Abhängigkeit von temporären und standörtlichen Gegebenheiten und ihren daraus resultierenden Abbildungseigenschaften (KOHN 1952, PACKMAN & PHILPOTTS 1955, BOESCH & BRUNN-SCHWEILER 1960, HAEFNER 1967, SCHEPIS 1968, HOWARD 1970, FRINKING 1972, CIOLKESZ 1974, NUNNALLY 1974 und DÖRFEL 1977). Die übergeordnete Zielsetzung dieser Art von Untersuchungen besteht darin, auf kostengünstige Weise möglichst präzise Erntemengenvorhersagen für volkswirtschaftlich wichtige Feldfrüchte zu treffen. Auf dieses Ziel wird intensiv hingearbeitet; das im Jahre 1978 abgeschlossene LACIE- (Large Area Crop Inventory)-Projekt der USA hat, ebenso wie ähnliche Vorhaben dieser Art, trotz hohem finanziellen und technologischen Einsatz bislang noch keine voll befriedigenden Ergebnisse zeitigen können (s.a. PARK 1977). Allerdings konnten bereits brauchbare Anhaltspunkte zur Schätzung der Weizenproduktion der Ostblockstaaten aus Satellitendaten erarbeitet werden. Da derartige Experimente elektronische Zeilenabtaster als Sensoren einsetzen, deren registrierte Daten über Großrechenanlagen automatisch ausgewertet werden sollen, seien sie an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Zur Optimierung der Anwendung der Luftbildtechnik ist stets die Frage nach dem kleinsten Maßstabsverhältnis, bei dem die eindeutige Identifizierung der für die Aufgabenstellung relevanten Bildinhalte möglich ist, zu beantworten. Je größer die auf einer Aufnahme abgebildete Fläche ist, desto höher ist die Einsparung an Material-, Flug- und Interpretationskosten. Die Auswertung von aus hochfliegenden Flugzeugen und bemannten Raumfahrzeugen der Apollo IX-, Gemini- und Skylab-Missionen fotografierten Aufnahmen ergab, daß die kleinmaßstäbigen Weltraumbilder ($m_b = \text{ca. } 1 : 3 \text{ Mio.}$) zu einer groben Landnutzungsklassifizierung (Wald/Acker/Weideland/Gewässer) sehr gut geeignet sind (ALDRICH 1971, WIEGAND et al. 1971, COLWELL 1972, LINS 1976). Von Bildern

der Maßstäbe 1 : 80 000 bis 1 : 100 000, die aus etwa 18 bis 20 km Flughöhe fotografiert wurden, sind bei Verwendung von IRC- oder Farbfilmmaterial Landnutzungsinterpretationen mit Klassifizierungsgenauigkeiten von über 90 % möglich (EYRE 1971, BATSON & ELLIOT 1975). Die Erstellung von Klassifizierungsschlüsseln als Interpretationshilfe erfolgt in allen Fällen durch stichprobenartige Vergleichserhebungen im Gelände und gegebenenfalls durch zusätzliche großmaßstäbige Befliegungen.

Besonders wirksam ist der Einsatz des Luftbildes in Regionen die bislang nicht nur geographisch, sondern auch bezüglich ihrer landwirtschaftlichen Struktur nur unvollständig erschlossen werden konnten. In vielen Ländern der Dritten Welt ist aber eine genaue Kenntnis der Gesamtanbaufläche einzelner Kulturen und der Anbauflächenverteilung die grundlegende Erfordernis, wenn Verbesserungen in der Ernährungs- und Einkommenssituation der Bevölkerung erreicht werden sollen. Zudem kann mit Hilfe von Luftaufnahmen eine Vielzahl weiterer Planungsaktivitäten wirksam begründet und unterstützt werden, beispielsweise in der Erschließung neuer Nutzungsflächen, der Verbesserung von Bewässerungsmaßnahmen, der Erweiterung des Wegenetzes etc. Außerdem können Mosaiks aus entzerrten Luftbildern eine anschauliche und - da Meßtischblätter oder gar Katasterkarten im allgemeinen nicht vorhanden sind - unentbehrliche Kartengrundlage darstellen. Im Rahmen von landwirtschaftlichen Entwicklungshilfe- und Förderungsprojekten wurden in Teilregionen einiger Länder zu solchen Zwecken Befliegungen und Bildauswertungen durchgeführt, so in Trinidad (BEARD 1941), Nepal (KARAN 1960), Liberia (KOCH 1970), Chile (Mac PHAIL 1971), Puerto Rico (HARNAPP & KNIGHT 1971), Argentinien (GARUTI 1974), Ceylon und Paraguay (FELDNER 1975) sowie Sumatra (VÖLGER 1975), um nur einige Beispiele zu nennen.

Als wichtige Standortsfaktoren für Kulturpflanzen sind die Böden im wahrsten Sinne von grundlegender Bedeutung für die Landwirtschaft. Aus diesem Grund soll hier auch auf die bodenkundliche Luftbildauswertung kurz eingegangen werden.

Die Möglichkeit der Erfassung oberflächlicher Bodenstrukturen mit Hilfe von Luftaufnahmen wurde schon frühzeitig erkannt (PRESCOTT & TAYLOR 1930, BUSHNELL 1932, SCHMITT 1936). Aus

wechselnden Texturen und der Art und dem Verlauf der Grauton- oder Farbzonen kann der bodenkundlich erfahrene Auswerter Rückschlüsse auf den Wasserhaushalt der obersten Bodenschichten, die Bodengenese, Erosionsvorgänge und sogar auf Bodentypen ziehen. Um insbesondere bei dem Versuch der Bodenklassifizierung, welche bekanntlich eine Charakterisierung der dreidimensionalen Schichtung des Boden darstellt, nicht zu Fehlaussagen zu gelangen, müssen neben der Kenntnis der jeweiligen Klimaverhältnisse auch Faktoren wie die Oberflächenformen des Geländes, Steilheit und Ausrichtung von Hangneigungen, natürlich vorkommende Pflanzenarten, Vorhandensein und Verlauf von Gewässern sowie Abtragungserrscheinungen berücksichtigt werden. Ebenso gehören zu solchen Arbeiten intensive Geländebegehungen mit der Entnahme und Untersuchung von Bodenprofilen, um sichere Vergleichsdaten für die bei der Bildauswertung durchzuführenden Interpolationen sicherzustellen (BURINGH 1954 und 1955). Diese Regeln waren bei den verhältnismäßig zahlreichen Versuchen, Bodentypen aus Schwarzweißaufnahmen anzusprechen, nicht immer beachtet worden (s. dazu u.a. RONKE & AUSTIN 1950, SIMONSON 1950 sowie POMMERING & CLINE 1953).

Mit der Verfügbarkeit von Farb- und IRC-Filmmaterial wurde die Arbeit auf diesem Gebiet bedeutend erleichtert; Vergleichsstudien resultierten in allen Fällen in einer Bevorzugung farbiger Aufnahmen (STEINMETZ 1957, PARRY et al. 1969, ANSON 1970, KUHL 1970). Weitere Resultate zur Anwendung dieser Filmtypen bei bodenkundlichen Fragestellungen sind bei CONDIT (1970), FRAZEE et al. (1971), GERBERMANN et al. (1971), CIHLAR & PROTZ (1972), FRYEREAR & WIEGAND (1974), PIECH & WALKER (1974) sowie MOSBACHER & SCHOLZE (1979) nachzulesen.

Schließlich soll noch erwähnt werden, daß die Luftbildfotografie offenliegenden, unbewachsenen Ackerlandes wichtige Hinweise auf die Feuchtigkeitsverhältnisse der oberen Bodenschicht der einzelnen Felder gibt. Durch einen Vergleich solcher Aufnahmen mit Bildern, welche während der Vegetationsperiode über demselben Areal erhoben wurden, können Unregelmäßigkeiten im Pflanzenwuchs, die durch Trockenheit infolge verringerter Wasserhaltekapazitäten bestimmter Flächenteile verursacht werden, als solche identifiziert und von anderen Schädwirkungen unterschieden werden.

An dieser Stelle sei auch noch erwähnt, daß Luftbilder von unbewachsenem Ackerland Hinweise über frühere Flurformen liefern und somit zur agrargeschichtlichen Dokumentation dienen können (JÄGER 1960, WALTER 1965).

II.2 Anwendung der Luftbildtechnik im landwirtschaftlichen Pflanzenschutz

Im Jahre 1927 wurde erstmals über die Erkennung von Schäden in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen aus Luftaufnahmen berichtet: nachdem ihm Piloten der US-Luftwaffe mitgeteilt hatten, daß Schäden in Baumwollkulturen, welche durch Wurzelfäule verursacht waren, selbst aus größerer Höhe (relativ zur Steigfähigkeit der damaligen Flugzeuge) noch eindeutig zu erkennen seien, unternahm NEBLETTE im Süden der USA einige Bildflüge. Auf den dabei erhaltenen Schwarzweißbildern, die er mit einer 13 x 18 cm-Handkammer mit 250 mm-Tessar-Objektiv aufgenommen hatte (resultierender $m_b = 1 : 320$ bis $1 : 640$), waren auf der gesamten abgebildeten Feldfläche gesunde von schwer geschädigten oder abgestorbenen Pflanzen zu unterscheiden (NEBLETTE 1927). Nach weiteren Versuchen schreiben TAUBENHAUS et al. (1929, S. 1028): "Das Verfahren scheint so gut brauchbar zu sein, daß wir vorschlagen können, es sowohl zur Schätzung von Ernteverlusten infolge Wurzelfäulebefalls als auch zur besseren Darstellung der Ergebnisse von Feldversuchen zur Wurzelfäulebekämpfung einzusetzen".

Trotz dieser optimistischen Aussage wurden in den folgenden nahezu drei Jahrzehnten weder diese Arbeiten weitergeführt noch neue Versuche an anderen Feldfrüchten und mit neuentwickeltem Aufnahmegerät und -material unternommen. Auf forstwissenschaftlichem Gebiet wurden währenddessen bedeutende Fortschritte bei der Inventarisierung geschädigter Bestände mit Hilfe von Luftaufnahmen erzielt.

Die infrarot-sensibilisierte Schwarzweißemulsion, die Anfang der dreißiger Jahre auf den Markt gebracht wurde, kam zunächst nicht bei Befliegungen zum Einsatz, was sicherlich größtenteils mit der damals geringen Lichtempfindlichkeit zu erklären ist. Daß grüne Pflanzenteile diesen neuen Schichttypus stark schwärzten, d.h. auf den Positiven in einem sehr hellen Grauton abgebildet wur-

den, erkannte man allerdings schon bald. BAWDEN (1933) verwendete aus diesem Grunde erstmals Infrarot-Platten zur fotografischen Darstellung virusgeschädigter Kartoffelblätter, denn mit konventionellem Filmmaterial war keine befriedigende Differenzierung zwischen den bräunlichen Nekrosen und dem Blattgrün zu erreichen. Bei dem gleichen Versuch mit virusbefallenen Tabakblättern erhielt er allerdings ein gegenteiliges Resultat: hier war das panchromatische Aufnahmematerial besser zur Darstellung des Krankheitsbildes geeignet.

Im Jahre 1935 berichtete BABEL über ähnliche Untersuchungen. Auch er erzielte unterschiedliche Ergebnisse: Schorf- und Dürreschäden an Apfelblättern ließen sich mit der Infrarot-Emulsion deutlicher darstellen als mit ortho- oder panchromatischen Beschichtungen; Krätze an Gurken- und Mehltau an Schwarzwurzelblättern dagegen nicht.

Beide Autoren konnten diese Erscheinungen, welche für die Fernerkundung von Pflanzenschädigungen von grundlegender Bedeutung sind, nur unzureichend erklären. In einem späteren Kapitel (S. 26 ff.) soll von den Grundzusammenhängen zwischen dem Aufbau eines Blattes und seinem spektralen Reflexionsverhalten noch näher die Rede sein.

Mit seiner umfassenden Studie über die Interpretation von Getreidekrankheiten aus Luftbildaufnahmen gab COLWELL (1956) gleichsam das Startsignal für die Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Erkennung von Pflanzenschäden mit Hilfe der Fernerkundung. Zwischenzeitlich - d.h. im Zeitraum, vor, während und nach dem Zweiten Weltkrieg - waren auf dem technologischen Sektor wesentliche Neuerungen und Verbesserungen entstanden, wie der luftbildtaugliche Farbfilm (1942), der IRC-Farbfilm (1943), höhere Auflösekapazitäten und gesteigerte Lichtempfindlichkeit bei Schwarzweißfilmen, verbesserte Kammeroptiken und -mechanik sowie weiterentwickelte und neuartige Geräte zur Bildauswertung. Ihre Verfügbarkeit im zivilen Bereich ermöglichte Untersuchungen auf zahlreichen Gebieten der angewandten Naturwissenschaften.

Schon ein Jahr nach der wegbereitenden Arbeit von COLWELL veröffentlichte STEINMETZ (1957) eine vergleichende Untersuchung zum Nutzen farbiger und schwarzweißer Luftaufnahmen für landwirt-

schaftliche und ökologische Zwecke. Wohl deshalb, weil es nicht zu seiner unmittelbaren Zielrichtung gehörte, erwähnte er seine Beobachtung, daß sich Krankheits- und Schädlingbefall an Zuckerrüben und Kartoffeln auf seinen Aufnahmen bis zum Bildmaßstab 1 : 10 000 deutlich erkennen ließen, nur nebenbei in zwei kurzen Sätzen. Obwohl diese Anmerkungen ohne Konsequenzen blieben, muß ihm damit zugestanden werden, daß er als Erster in Mitteleuropa biotische Schäden in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen aus Fernerkundungsaufzeichnungen erkannt hat.

Im folgenden sollen, nach Kulturarten aufgeteilt, die bisherigen Arbeiten und Ergebnisse vorgestellt werden, bei denen mit Hilfe von Luftaufnahmen Schadwirkungen erfaßt werden konnten.

K o k o s (*Cocos nucifera*)

DAKSHINAMURTHI et al. (1971) stellten die potentielle Einsatzmöglichkeit der Luftbildfotografie bei der Inventarisierung welckrankter Kokospalmen fest. Durch diese Viruskrankheit verursachte farbliche (Vergilbung des äußeren Blattkranzes, anormale Blattkrümmungen) und texturelle (verkleinerter Kronendurchmesser) Unterschiede zu gesunden Palmen ermöglichten die visuelle Interpretation erkrankter Pflanzen aus IRC-Aufnahmen des Bildmaßstabes 1 : 2 500.

B a u m w o l l e (*Gossypium* spp.)

Blätter von Baumwollpflanzen, die auf Böden mit hohem Salzgehalt wuchsen, ließen sich auf Farb- und IRC-Aufnahmen, die mit einer Kleinbildkamera aus 10 m Höhe fotografiert worden waren, deutlich von Blättern solcher Pflanzen unterscheiden, welche ohne toxische Salzkonzentrationen aufgewachsen waren (GAUSMAN et al. 1970 a). Über die Einflüsse von Stickstoffmangel und toxischen Chloridgehalten im Nährmedium auf die spektralen Reflexionseigenschaften von Einzelblättern hatten schon THOMAS et al. (1966) berichtet.

TAWFIK et al. (1974) stellten fest, daß IRC-Bilder von Blättern, welche von drei Wochen alten, mit *Fusarium oxysporum*-infizierten Baumwollpflanzen stammten, diese klar von gesunden Blättern differenzierten. Gleiche Versuche mit *Alternaria tenuis*-befallenen Blättern ergaben, daß Unterschiede auf dem Film erst drei Monate nach der Infektion, bei weit fortgeschrittenem Krankheitsstadium,

erkennbar waren.

Ebenfalls mit der Unterscheidbarkeit einzelner Blätter von gesunden und nematodenbefallenen (*Meloidogyne incognita*) Pflanzen auf fotografischem Wege befaßten sich ABOUL-EID et al. (1974). Sie stellten fest, daß IRC-Film die besten Differenzierungsmöglichkeiten bot.

Studien dieser Art geben wertvolle Hinweise auf die potentielle Erfassung von Pflanzenschäden durch Luftbildaufnahmen; der nächste Schritt ist die probeweise Befliegung und Bildauswertung.

HEALD et al. (1972) konnten auf IRC-Luftaufnahmen der Bildmaßstäbe 1 : 4 000 und 1 : 8 000 Nematodenschäden, welche durch *Rotylenchus reniformis* verursacht worden waren, festhalten und gleichzeitig die Wirksamkeit von Bekämpfungsversuchen mit unterschiedlichen Konzentrationen eines nematiziden Pflanzenschutzmittels feststellen.

Die in Feldversuchen durch den Wuchshemmer Chlorcholinchlorid (CCC) an Baumwollblättern bewirkten Flächenvergrößerungen und inneren Strukturveränderungen (annähernd dreifach vermehrte Anzahl interzellulärer Lufträume im Mesophyll) äußerten sich auf IRC-Luftbildern in charakteristischen Farbtonänderungen im Vergleich zu unbehandelten Parzellen (GAUSMAN et al. 1970 c).

Z i t r u s (*Citrus* spp.)

NORMAN & FRITZ (1965) und NORMAN (1968) beschreiben eingehende Untersuchungen zur Anwendung der IRC-Luftbildtechnik bei der Erfassung von Zitruskrankheiten. Bildmaßstäbe von 1 : 1 500 bis etwa 1 : 5 000 waren geeignet, um - bei Beachtung der erarbeiteten optimalen Befliegungstermine - Schäden festzustellen, welche von Fachleuten bei der Bonitierung vom Boden aus nicht beobachtet werden konnten. Dabei handelte es sich vor allem um Viruskrankheiten wie *Tristeza*, *Psorosis*, *Xylopsorosis* und *Exocortis*, welche auf dem Film unspezifische Farbtonänderungen der Kronen infolge veränderter Blattreflexion und -stellung verursachen. Die Autoren vertreten die Ansicht, daß im Falle von *Tristeza* und *Psorosis* sogar latent vorliegende Infektionen auf den Bildern erkannt werden können.

Ebenfalls unter Verwendung des IRC-Filmes gelang es GAUSMAN et

al. (1970 b) und GAUSMAN (1971 a), bei einem Bildmaßstab von 1: 4 000 Wurzelfäule an Grapefruit (*Citrus paradisi*) welche durch die Pilze *Phytophthora citrophthora* und *Phytophthora parasitica* verursacht wird, zu erfassen. Unter den gleichen Aufnahmebedingungen konnten sie außerdem Schäden an Grapefruit und Valencia-Orangen, hervorgerufen durch einen zu hohen Gehalt an Bor und Chlorid im Boden, feststellen. Diese Schadwirkungen äußern sich in einer um 12 bzw. 4 % verminderten Reflexionsintensität im grünen bzw. infraroten Spektralbereich (CARDENAS et al. 1971). Des weiteren bestätigten diese Autoren die sichere Erfassung des Befalls durch die Braune Schildlaus (*Coccus hesperidum*), die dadurch ermöglicht wird, daß sich auf dem Honigtau, den diese Insekten ausscheiden, Rußpilze (*Capnodium citri*) ansiedeln, wodurch die befallenen Blätter alsbald mit einem dichten Belag schwarzen Mycels überzogen sind. Die dadurch bewirkte erhebliche Reflexionsminderung im sichtbaren und nahen Infrarotbereich bildet sich auf den Luftaufnahmen deutlich ab, wie bereits HART & MEYERS (1968) erkannt hatten. Letztere erwähnten auch den praktischen Wert dieser Resultate und errechneten eine Kostenreduzierung um rund 50 Prozent, welche bei der Anwendung der Luftbildtechnik infolge von Einsparungen an Personalkosten bei der Bonitierung der Pflanzungen und an Insektizidmengen (durch gezielte Applikation anstelle von ganzflächigen Präventivspritzungen) erreicht werden kann.

Für die ebenfalls aufgrund sekundären Rußpilzbefalls mögliche Interpretation von Kalamitäten der Schwarzen Zitrusfliege (*Aleurocanthus woglumi*) und des Zitrus-Mehlkäfers (*Pseudococcus citri*) aus Luftaufnahmen bis zu einem Bildmaßstab von ca. 1 : 10 000 kalkulierten HART et al. (1973) bei der Befliegung von über 50 000 ha konzentrierter Anbaufläche gar eine Kostenersparnis um rund 63 Prozent.

M a i s (*Zea mays*)

BAUER et al. (1971) erreichten bei der visuellen Auswertung von IRC-Luftaufnahmen ($m_b = 1 : 10\ 000$) eine Genauigkeit von 91 Prozent in der Ansprache von Maisfeldern, die von *Helminthosporium maydis*, einer Blattfleckenkrankheit, befallen waren. Eine Präzision von 76 Prozent wurde bei der Klassifikation in Schadstufen erzielt. Da sich die Infektion von den basalen Blättern aus nach

oben ausbreitet, ist diese Krankheit erst im fortgeschrittenen Stadium aus der Sicht von oben zu erkennen. Als Folge dieser Arbeitserfolge wurde in Anbetracht der wirtschaftlichen Bedeutung, die dieser Krankheit in den USA zukommt, das sogenannte Corn Blight Watch Experiment ins Leben gerufen, in dessen Rahmen im Maisgürtel der USA großflächige Befliegungen mit IRC-Film und Multispektralscannern durchgeführt wurden. Die Experimente konnten im Jahre 1973 erfolgreich abgeschlossen werden (NASA 1973).

Auch bei Mais treten Schadinsekten auf, in deren Gefolge sich Rußpilze ansiedeln. Es handelt sich hierbei um Blattläuse (*Rhopalosiphum maidis*) und die Honigtauparasiten *Alternaria tenuis* und *Cladosporium herbarum*. Auf IRC-Aufnahmen der Maßstabsverhältnisse 1 : 9 600 und 1 : 6 000 konnten JACKSON et al. (1974) sowie WALLEN et al. (1976) diese Schäden visuell interpretieren und durch Trommelscanner flächenmäßig quantifizieren.

CHIANG et al. (1973) erzielten bei Versuchen zur Erkennung von Blattfraß durch Insekten (Heerwürmer, Heuschrecken) mit IR-Schwarzweißfilmen in Kombination mit einem Filter, dessen Absorptionskante bei ca. 720 nm liegt, bei einem Aufnahmemaßstab von 1 : 6 500 die besten Resultate. Dabei sind Fraßschäden insbesondere dann leicht erfaßbar, wenn die apikalen Blätter betroffen sind. Allerdings waren die Autoren mangels einer vorhandenen Schadsituation zur Simulation durch Entblättern der Pflanzen von Hand gezwungen, worauf anschließend die Befliegungsversuche durchgeführt wurden.

Eine Studie aus Ägypten (ABOUL-EID 1974) schließlich ergab, daß auch Nematodenschäden, verursacht durch *Hoplotaimus aegyptii*, mit Hilfe von IRC-Luftaufnahmen erfaßt werden können.

K a r t o f f e l n (*Solanum tuberosum*)

Bezüglich ihrer Erkennbarkeit mit Hilfe der Fernerkundung ist bislang unter allen Kulturpflanzenkrankheiten die Kraut- und Knollenfäule der Kartoffel, verursacht durch den Pilz *Phytophthora infestans* am eingehendsten untersucht worden. Dies erklärt sich zum einen aus ihrer ökonomischen Bedeutung - ohne aufwendige Gegenmaßnahmen würden alljährlich ein großer Teil der Kartoffelernte vernichtet werden - zum anderen aus ihrer Symptomatologie

und Epidemiologie, welche ideale Voraussetzungen für ihre Erfassung durch Luftaufnahmen beinhaltet. Die Krankheit, die zunächst schwere Läsionen am Blattwerk verursacht, breitet sich, ausgehend von einem außerhalb gelegenen Infektionsherd, unter günstigen Bedingungen (feuchtwarme Witterungsverhältnisse) rasch im Bestand aus, wobei zunächst vereinzelt begrenzte Flächen befallen werden. Von diesen sekundären Infektionsherden aus werden weitere Pflanzen infiziert, bis schließlich der gesamte Bestand erkrankt ist.

Die Engländer BRENCHELEY & DADD (1962) wiesen als Erste die Möglichkeiten der Luftbildtechnik als Hilfsmittel bei der Erfassung dieser Krankheit nach. In Verbindung mit meteorologischen Daten konnten sie zeitlich und örtlich gezielte Befliegungen mit IR-Schwarzweißfilmen durchführen und anhand der Interpretationsergebnisse Empfehlungen zu Gegenmaßnahmen aussprechen (s. auch BRENCHELEY 1966 und 1968). Diese Resultate wurden in den USA von COOPER & MANZER (1964) und MANZER & COOPER (1965 und 1967) aufgegriffen und bestätigt. Im Verlauf ihrer Untersuchungen konnten sie die Verfahrenstechnik verfeinern und optimieren. Densitometrische Messungen an IRC-Material ergaben gute Korrelationen zwischen Bildinhalt und Feldbonitierungen. Ihren Beobachtungen zufolge ist auf IR-Schwarzweiß- und -Farbluftbildern eine prävisuelle Schaderkennung möglich, d.h. auf den Aufnahmen sind Grauton- oder Farbunterschiede, welche auf Schädigungen im Bestand hinweisen, festzustellen, bevor sie vom Boden aus an den Pflanzen sichtbar sind. Da jedoch keine meßtechnischen Untersuchungen am Objekt selbst durchgeführt wurden, muß dieser Aspekt ihrer Arbeit zunächst in Frage gestellt werden.

Ober weitere Untersuchungen zur Sicherheit der Schadansprache, welche in erster Linie die Korrelierbarkeit zwischen digitalisierten mikrodensitometrischen Messungen an IRC-Luftbildern ($m_b = \text{ca. } 1 : 3\,500$) und Bodenerhebungsdaten betreffen, berichten JACKSON & WALLEN (1976). Dabei fanden sie einen sehr hohen Korrelationsgrad mit Irrtumswahrscheinlichkeiten von unter 1 %. Bemerkenswert ist, daß WALLEN et al. (1976) bei einem Korrelationsgrad von 0,8 % mittels dieser Dichtemessungen Schäden interpretieren konnten, welche erst 20 Tage nach dem Befliegungszeitpunkt im Bestand erkennbar waren. Sie ziehen daraus den Schluß,

daß bereits zum Aufnahmetermin physiologische, nicht aber visuell manifestierte Unterschiede vorlagen. Aus biologischer Sicht kann diese prävisuelle Schaderkennung, welche die Ergebnisse von MANZER und COOPER bestätigt, vermutlich damit erklärt werden, daß die durch die Spaltöffnungen in das Blatinnere eingedrungenen Hyphen das Mesophyll - insbesondere die interzellulären Lufträume - bereits weitgehend durchwuchert hatten, was Änderungen der spektralen Reflexion, insbesondere im Nahen IR, zur Folge hatte. Durch eine unmittelbar nach der Infektion einsetzende Trockenperiode wurde der weitere Krankheitsverlauf stark gehemmt, so daß erst später sichtbare Symptome auftraten.

HOFMANN (1974) und WOLFF (1974) berichteten über erste Erfahrungen in der Schätzung von Ertragsverlusten, die durch das Auftreten des Kartoffelnematoden *Heterodera rostochiensis* verursacht wurden, mit Hilfe der visuellen Interpretation von Luftbildern. Auf den - leider nicht näher spezifizierten - Aufnahmen konnten geschädigte Bestandesteile erkannt werden. Die Bestimmung der ökonomischen Auswirkungen des Befalls waren allerdings noch nicht ausreichend genau. Beide Autoren kommen zu der Schlußfolgerung, daß konventionelle terrestrische Untersuchungen damit zunächst nicht ersetzt, jedoch erheblich rationalisiert werden können.

Einige weitere Schädigungen, verursacht durch *Verticillium* sp., Wasser- oder Nährstoffmangel, können ebenfalls mit Hilfe der Luftbildfotografie erkannt werden (MANZER & COOPER 1967).

B o h n e n (*Phaseolus vulgaris*)

Ober mehrere Jahre hinweg wurden in Kanada Untersuchungen zur Fernerkundung der Blattfleckkrankheit der Bohnen durchgeführt. Mit dem Saatgut übertragen, kann das Bakterium *Xanthomonas phaseoli* in dieser regionalwirtschaftlich sehr bedeutenden Kultur schwere Ertragsverluste verursachen. Es ruft pustelartige Flecken auf den Blättern hervor, und von einzelnen befallenen Pflanzen aus können benachbarte Pflanzen infiziert werden. Es liegt also auch hier ein von oben gut sichtbares und bezüglich seines zweidimensionalen Ausbreitungsmusters definiertes Krankheitsbild vor. Zur Erfassung dieser Schadwirkung durch IRC-Luftaufnahmen, welche im Vergleich zu IR-Schwarzweiß- und Farbbildern

die besten Resultate erbrachten, berichten BRENCHLEY (1968), PHILPOTTS & WALLEN (1969), WALLEN & PHILPOTTS (1971), WALLEN & JACKSON (1971), WALLEN (1975), JACKSON & WALLEN (1975) und WALLEN & GALWAY (1976). Ihre Aufnahmen wurden visuell und durch mikrodensitometrische Messungen mit Digitalisierung der Meßwerte und nachfolgender Verarbeitung im Computer oder über fotografische Umkopierprozesse und Digitalisierung im Trommelscanner ausgewertet. Bildmaßstäbe von 1 : 3 600 und 1 : 8 400 erwiesen sich als brauchbar. Frühe Befallsstadien konnten nicht festgestellt werden; erst wenn deutliche Symptome an den Blättern auftraten, manifestierten sich die Schäden meß- und sichtbar in den Luftbildern. Das ist in diesem Falle jedoch nicht von Belang, da eine kurative Behandlung bakterieller Erkrankungen im Ackerbau im allgemeinen nicht durchgeführt werden kann. Für die Gewinnung von pathogenfreiem Saatgut ist eine solche Schadinventur dagegen von größter Bedeutung.

Nach der Erarbeitung eines Ertragsverlustfaktors durch Feldversuche konnten WALLEN & JACKSON (1975) eine einfache, praxisgerechte Formel für die Schätzung der Ertragsminderung mit Hilfe der Luftbildauswertung aufstellen. Danach ist:

$$\text{Ertragsverlust (\%)} = \text{befallene Fläche (\%)} \times \text{Anbaufläche (ha)} \times \text{durchschnittlicher Ertrag (kg/ha)} \times \text{Ertragsverlustfaktor (\%)}$$

Aufgrund guter Erfolge mit dieser Verfahrensweise, die von BASU et al. (1978) noch verfeinert wurde, empfehlen die beiden Autoren dieses Verfahren als Prototyp für ähnliche Anwendungsbereiche.

ARNETT (1975 und 1976) versuchte, in Sojabohnenfeldern (*Glycine max*) auftretende, durch Zystennematoden der Art *Heterodera glycines* verursachte Schäden durch die Interpretation von Luftaufnahmen des Bildmaßstabes 1 : 10 000 festzustellen. Nach ersten Resultaten waren auf keinem der verwendeten Filmtypen (Schwarzweiß, Farbe und IRC) Nematodenschäden eindeutig zu interpretieren. Allerdings konnten Schadwirkungen allgemein als solche angesprochen werden; bei nachfolgenden Feldbegehungen fand man die Ursache in Nährstoffmangel, Zysten-, Wurzelknollen- und stechenden Nematoden, oder in schädlichen Bodensäuregehalten. Wenngleich das ursprüngliche Ziel damit noch nicht direkt erreicht werden konnte, werden diese Ergebnisse positiv beurteilt,

da eine Erfassung geschädigter Areale damit ganz erheblich vereinfacht und verbilligt werden kann.

G e t r e i d e

In einem früheren Abschnitt wurde bereits auf die Arbeit von COLWELL (1956) hingewiesen. Er hatte mit Erfolg versucht, durch Luftbildinterpretation Weizengelbrost (*Puccinia graminis tritici*), Hafergelbrost (*Puccinia graminis avenae*) und durch Viren verursachten Zwergwuchs mit Vergilbung an Hafer festzustellen.

BRENCHLEY (1968) konnte aus Luftaufnahmen die Schwarzbeinigkeit des Getreides (*Ophiobolus graminis*), Lagerschäden und Befall mit der Weizenknospenfliege (*Leptohylemyia cordata*) interpretieren.

Aufgrund dieser Resultate werden in England, wo aufgrund der meteorologischen Gegebenheiten insbesondere Pilzkrankheiten in Weizen, Gerste und Hafer sehr häufig sind, von Seiten der staatlichen Landwirtschaftsbehörde regelmäßig Bildflüge über weite Gebiete durchgeführt mit dem Ziel, krankheitsbedingte Ertragsverluste zu quantifizieren und Gegenmaßnahmen zu erarbeiten (HOOPER 1977).

WOLFF (1974) und HOFFMANN (1974) stellten mit den vorläufigen Ergebnissen ihrer Befliegungen zwar fest, daß Nematodenschäden in Hafer (verursacht durch *Heterodera avenae*) und in anderen Getreidearten (wandernde Wurzelnematoden der Gattung *Pratylenchus*) nicht eindeutig als solche identifiziert werden konnten, zusammen mit anderen Schadwirkungen aber erkannt werden. Der Bildauswertung folgende, gezielte Feldbegehungen ermöglichen eine rasche, präzise Bonitierung bei erheblicher Ersparnis an Zeit und Kosten.

Z u c k e r r ü b e n (*Beta vulgaris*)

Bei der Interpretation von IRC-Luftaufnahmen ($m_b = 1 : 2\,000$ und $1 : 4\,000$) eines parzellierten Versuchsfeldes fanden MEYER & CALPOUZOS (1968), daß die auf der Erde bonitierten Schadstufen mit Farbunterschieden im Bild korreliert waren. Das Feld war künstlich mit *Cercospora beticola*, dem Verursacher der Blattfleckenkrankheit, infiziert und anschließend parzellenweise

mit verschiedenen Konzentrationen unterschiedlicher Fungizide behandelt worden. Die Schadstufenklassifizierung umspannte einen Bereich von 0 (keine Schädigung) bis 5 (alle Blätter außer den jüngsten absterbend). Die zum Befliegungszeitpunkt bonitierten Stufen von 1,5 bis 4 waren als 4 Farbabstufungen zu erkennen.

Wie auch der bereits zitierte STEINMETZ (1957) erwähnt BRECHLEY (1968) seine Erkenntnisse bezüglich der Erfassung von Nematodenschäden nur am Rande. Während BEHRINGER (1976) aufgrund eigener, allerdings nicht näher spezifizierter Befliegungen die Ansicht vertritt, diese Art von Schadwirkungen sei mit Hilfe der Luftaufnahmen nicht als solche zu erkennen, berichtet REICHERT (1975) über erfolgversprechende erste Untersuchungen zu diesem Problem. Im Hauptteil dieser Arbeit werden eigene Studien hierzu ausführlich behandelt werden.

V e r s c h i e d e n e K u l t u r e n

GAUSMAN et al. (1974) führten eingehende Untersuchungen zur Abbildungsänderung von unter Eisenmangel leidenden Hirsepflanzen (*Sorghum bicolor*) im Vergleich zu gesunden Pflanzen durch. Auf IRC-Aufnahmen des Maßstabes 1 : 1 000 fanden sie neben einer deutlichen visuellen Interpretierbarkeit auch statistisch signifikante Unterschiede bei der densitometrischen Bildauswertung.

In Zuckerrohrbeständen (*Saccharum officinarum*) konnten THOMAS & OERTHER (1977) Korrelationen zwischen Stickstoffversorgung, Ertrag und optischer Dichte von IRC- und Farbluftaufnahmen feststellen.

CARDENAS et al. (1972) berichteten über die Möglichkeit der prä-visuellen Erkennung des Befalls von Gurken (*Cucumis sativus*) mit dem Wassermelonen-Mosaikvirus aus großmaßstäbigen IRC-Luftbildern.

Auch GAUSMAN et al. (1978) konnten auf - allerdings terrestrischen - IRC-Fotografien Schäden an Kürbis (*Cucumis melo*) feststellen, bevor die sich visuell manifestierten. Es handelte sich hierbei um die Auswirkungen eines zu hohen Ozonanteils in der Luft, der in den USA für rund 90 % aller Vegetationsschäden infolge von Luftverschmutzung verantwortlich ist und im Pflanzenbau zu beträchtlichen Ertragsverlusten führen kann. Schon 1969 hatte JOHNSON erfolgreich Untersuchungen zur Erkennbarkeit einer an-

deren Art pflanzenschädigender Umweltbelastung, nämlich durch γ -Strahlung, mit Hilfe von Luftaufnahmen durchgeführt.

Schließlich seien noch zwei Beispiele für die Anwendung der Fernerkundung bei der Überwachung von Insektenkalamitäten genannt: LEROUX (1974) konnte im inneren Nigerdelta (Mali) durch systematische Befliegungen zu verschiedenen Zeiten im Jahresverlauf und Interpretation des kleinmaßstäbigen (ca. 1 : 50 000) Schwarzweiß- und IR-Schwarzweißmaterials Karten erstellen, aus denen der Verlauf der Vegetationsentwicklung ersichtlich wird. In Zusammenhang mit der Kenntnis des Vermehrungsverhaltens der Afrikanischen Wanderheuschrecke (*Locustus migratoria migratorioides*), deren Schwärme immer wieder verheerende Schäden hinterlassen, können daraus die Orte bestimmt werden, die von den Tieren mit größter Wahrscheinlichkeit zur Massenvermehrung angefliegen werden. Dadurch werden gezielte Gegenmaßnahmen ermöglicht.

Die in den südlichen USA rasch zunehmende Verbreitung der eingeschleppten Feuerameise *Solenopsis invicta* führt aufgrund der vielfältigen Schadwirkungen, welche diese Insekten verursachen, zu einer wachsenden Besorgnis unter den Landwirten und der übrigen Bevölkerung. Da eine Bestandsaufnahme vom Boden aus sehr kostspielig und langwierig wäre, versuchten INGLE et al. (1975), Vorkommen, Verteilung und Größe der Ameisenhögel aus Luftbildern zu inventarisieren. Die Interpretation von IRC-Aufnahmen des Maßstabes 1 : 3 000, die bei tiefstehender Sonne erfolgen worden waren, ergab in Verbindung mit Vergleichskontrollen vor Ort eine Identifikationsgenauigkeit von über 80 % bei erheblichen Kosteneinsparungen.

U n k r ä u t e r

Aufgrund ihrer Konkurrenzwirkung gegenüber Kulturpflanzen können Unkräuter erhebliche Ertragsverluste verursachen. Um Maßnahmen zu ihrer Beseitigung einleiten zu können oder auch um die Genauigkeit von Ernteschätzungen zu verbessern, wäre eine großräumige Erfassung ihres Auftretens mit Fernerkundungsverfahren hilfreich und wünschenswert. Da sie jedoch stets mit den Kulturpflanzen vergesellschaftet sind, ist ihre Erkennung aus der Sicht von oben nur dann möglich, wenn sie (a) diese in der Wuchshöhe übertreffen, (b) bei gleicher oder größerer Wuchshöhe andere

spektrale Reflexionseigenschaften aufweisen, etwa aufgrund ihres fortgeschrittenen Entwicklungsstadiums, oder (c) wenn kein geschlossener Bestand vorliegt und sie den Boden zwischen den Pflanzenreihen bedecken. Außerdem ist theoretisch abzuleiten, daß sich die spektrale Signatur eines Pflanzenbestandes mit Unkrautunterwuchs im Bereich des Nahen IR aufgrund eines größeren Blattflächenindex im Vergleich zu unkrautfreien, gleichaltrigen Beständen der gleichen Art prozentual erhöht. Ob jedoch die sicherer Erfassung und Klassifizierung einer solchen Änderung mit Fernerkundungstechniken möglich werden wird, ist noch ungewiß.

Das Auftreten von Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*) und Flughafer (*Avena* sp.) in Getreide kann aus IRC-Luftaufnahmen festgestellt werden, wenn diese Gräser die Kulturpflanzen überragen und früher als die Getreidepflanzen reifen, so daß sich ihre helleren Ähren bzw. Rispen deutlich erkennen lassen (Ministry of Agriculture, 1975).

Aus dem gleichen Grund läßt sich das Vorkommen der Hühnerhirse (*Echinochloa crus-galli*) in Reisfeldern aus IRC-Luftbildern interpretieren (KÖDER 1979).

GAUSMAN et al. (1977 a und 1977 b) konnten das Auftreten der Silberblättrigen Sonnenblume (*Helianthus argophyllus*), einer Pflanze, welche sich auf Weideflächen mit sandigem Boden im Süden der USA zusehends verbreitet und die für das Vieh ungenießbar ist, auf IRC-Luftaufnahmen erfassen. Aufgrund ihrer dichten Blattbehaarung und einer damit verbundenen Erhöhung der spektralen Reflexionsintensitäten im sichtbaren und im Nahen IR-Bereich des Spektrums ist sie von anderen Pflanzen klar zu differenzieren. Mit Hilfe der Luftbildauswertung können die Zentren ihres Vorkommens erfaßt, ihre Verbreitung überwacht und Bekämpfungsmaßnahmen rationalisiert werden.

Das Strauchgewächs *Chrysothamnus viscidiflorus* ("Great Rabbit-brush") ist mit die wichtigste Unkrautpflanze auf Weideland in Mittelgebirgslagen der USA. Da sie vom Vieh gemieden wird, nimmt ihre Verbreitungsdichte ständig zu. Einmalige Herbizidapplikationen zu ihrer Abtötung sind nicht immer in ausreichendem Maße wirksam, so daß Nachbehandlungen notwendig werden. Aufgrund der

großen Flächen ist eine Erfolgskontrolle vom Boden aus allerdings kaum durchführbar. Durch die Interpretation von 70 mm-IRC-Luftbildern des Maßstabs 1 : 600, die zwei bis vier Wochen nach der Herbizidbehandlung aufgenommen worden waren, kamen YOUNG & EVANS (1972), EVANS & YOUNG (1973) und YOUNG et al. (1976) nach mehrjährigen Untersuchungen zu dem Ergebnis, daß mittels dieses Verfahrens auf wirtschaftliche Weise (trotz des großen Bildmaßstabs!) die Mortalität der behandelten Pflanzen mit einer Sicherheit von 90 % angesprochen und Empfehlungen für eventuelle Folgemaßnahmen gegeben werden können.

Über ihre Untersuchungen zur Bonitierung von Herbizidversuchsanlagen im Freiland aus großmaßstäbigen ($m_b = \text{ca. } 1 : 1\,300 \text{ und } 1 : 2\,100$) 70 mm-IRC-Luftaufnahmen berichten HAEFNER et al. (1971), HAEFNER & GFELLER (1972) und HAEFNER & MAURER (1973). Dabei erbrachte auch die digitale Verarbeitung der Bildinformation über ein Mikrodensitometer noch keine endgültigen Aussagemöglichkeiten zu einer praktischen Anwendbarkeit dieser Methodik, wobei betont werden muß, daß es sich um die ersten Versuche dieser Art handelte.

A b i o t i s c h e S c h a d w i r k u n g e n

Einige Beispiele zur Erfassung von Nährstoffmangel- sowie Emissionsschäden wurden bereits in den vorangegangenen Abschnitten genannt; auf eine Wiederholung kann daher verzichtet werden. Auch die Problematik bodenbedingter Trockenschäden ist schon in II.1 angeführt worden. Der Einfluß von Perioden anhaltend trockener Witterung während der Vegetationszeit auf die Abbildung von Pflanzenbeständen konnte im Rahmen des Deutschen Flugzeugmeßprogramms, das im Jahre 1976 durchgeführt wurde, eingehend studiert werden (REICHERT 1975, BRUCHHAUSER 1979).

Lagerschäden in Getreide, die als Folge heftiger Gewitter relativ häufig zu beobachten sind, können aus Luftaufnahmen leicht erkannt werden (MEIENBERG 1966, BOESCH & BRUNNSCHWEILER 1960, HAEFNER 1967).

Die von Naturkatastrophen wie Überschwemmungen, Hagelschlag oder Stürmen hinterlassenen Verwüstungen können mit Hilfe der Luftbildtechnik rasch inventarisiert werden; zudem sind daraus Empfehlungen zur Behebung der vorhandenen Auswirkungen und zur

Entschädigung der Betroffenen abzuleiten (u.a. OHYA 1961, KOLB 1962, NAKANO et al. 1962).

II.3 Grundlagenuntersuchungen

Die in den vorangegangenen Abschnitten zusammengestellten Resultate von Versuchen zur Erfassung von Kulturpflanzenbeständen und darin auftretender Schadwirkungen aus Luftaufnahmen zeigen, daß die Anwendung dieser Technik bedeutende Fortschritte im Hinblick auf die Verbesserung der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion mit sich bringen kann.

Durch die vergleichende Untersuchung des Bildmaterials und der Gegebenheiten im Gelände können Interpretationsschlüssel erarbeitet und mit ihrer Hilfe Kulturarten klassifiziert und Schäden angesprochen werden. Die grundlegenden Faktoren bei der Objektklassifizierung aus Senkrechtluftbildern sind neben Form und Größe Grauton bzw. Farbe, Textur und Stereoeffekt. Im Falle der Unterscheidung zwischen gesunden und geschädigten Bestandteilen kommt den Grauton- oder Farbdifferenzen primäre Bedeutung zu. Diese sind gleichbedeutend mit auf dem Filmmaterial aufgezeichneten Unterschieden in den spektralen Reflexionseigenschaften der Pflanzen.

Um wissenschaftlich befriedigende Aussagen zur Erkennung von Pflanzenschäden treffen zu können, müssen die Grundlagen dieser Reflexionsverhältnisse untersucht werden. In diesem Abschnitt seien daher die in der Literatur beschriebenen Verfahren angeführt, welche zur Ermittlung solcher Daten eingesetzt werden.

II.3.1 Die spektralen Reflexionseigenschaften von Pflanzenteilen (Blättern)

Hier soll wiederum zunächst ein kurzer, aber weitgehend vollständiger Abriß zur historischen Entwicklung gegeben werden. Ein solcher Überblick ist nicht nur aus der Sicht der Technik oder der Fernerkundung interessant, sondern auch aus derjenigen der Pflanzenphysiologie und Biophysik. Die spektralen Eigenschaften von Pflanzenteilen, insbesondere von Blättern, waren nämlich ursprünglich daher besonders erfahrungswert, weil die Wissenschaftler daraus Aufschlüsse über den Energiehaushalt der Pflanzen, sprich die Vorgänge bei der Photosynthese, Trans-

piration und Wärmeabstrahlung gewinnen wollten.

Zunächst sei folgendes vorausgeschickt: die möglichen Interaktionen zwischen elektromagnetischer Strahlung und einem Körper sind Reflexion (R), Transmission (T) und Absorption (A). Nach dem Satz von der Erhaltung der Energie gilt für eine gegebene Wellenlänge λ die einfache Beziehung $R_\lambda + T_\lambda + A_\lambda = 1$. Sind also zwei dieser Größen bekannt, so ist die dritte leicht zu errechnen. Da die Absorption meßtechnisch nur schwer zu erfassen ist, werden Reflexion und Transmission bestimmt, wobei prinzipiell der an einem Körper reflektierte bzw. der hindurchgedrungene Energieinhalt eines Strahlenbündels gemessen und mit seinem ursprünglichen Energieinhalt verglichen wird.

In der wohl ersten Arbeit auf diesem Gebiet in bezug auf Pflanzen beschreibt SACHS (1860) seine Resultate bei Versuchen zur "Durchleuchtung der Pflanzentheile". Er bemerkt dabei: "Strahlen größerer Wellenlänge können tiefer in pflanzliches Gewebe eindringen"; eine Aussage, die, wie wir heute wissen, zwar nicht für den Chlorophyllabsorptionsbereich im Rot (680 nm) gilt, aber im übrigen durchaus richtig ist. Wichtige Grundlagenuntersuchungen führte VIERORDT (1873) durch, der sich wie SACHS der Sonne als Lichtquelle bediente, aber neben der Transmission auch die Reflexion zu messen versuchte.

Weitere Pionierarbeiten, die großenteils von technischem Erfindergeist und folgerichtigen Denkansätzen beseelt waren, deren Aussagen und Schlußfolgerungen jedoch aufgrund der unzureichenden Empfindlichkeit der Meßempfänger sich in der Folgezeit nicht immer als richtig erwiesen, wurden von REINKE (1886), LINSBAUER (1901), URSPRUNG (1903), BROWN & ESCOMBE (1905) sowie BROWN & WILSON (1905) geleistet. Die zunächst vielbeachteten Ergebnisse der beiden letzteren Arbeiten, die besagten, daß in der Strahlungsbilanz eines Blattes zwischen eingestrahelter und wieder abgegebener Energie ein vollständiges Gleichgewicht herrsche, wurde von SHULL (1929) widerlegt. Jene Autoren waren nämlich der Ansicht gewesen, aus der Messung des transmittierten Strahlungsanteils allein auf die gesamte Energiebilanz schließen zu können.

Mit den Unterschieden in spektralen Transmissionseigenschaften zwischen Pigmentextrakten einerseits und Blättern der Pflanzen,

aus denen diese Extrakte gewonnen worden waren andererseits beschäftigten sich IWANOWSKI (1907) und URSPRUNG (1918). Schon zuvor hatte LINSBAUER (1901) vermutet, daß die geringere Transmission pigmenthaltiger Stellen panaschierter Blätter im Vergleich zu pigmentlosen Stellen im Wellenlängenbereich zwischen 350 und 650 nm nicht mit der Pigmentierung allein zu erklären ist, sondern daß auch unterschiedliche Reflexionseigenschaften vorliegen könnten. Zudem hatte er auf die Möglichkeiten erhöhter Reflexion bei Blättern mit verhältnismäßig starker Wachsbeschichtung hingewiesen.

Beachtenswert ist auch die Arbeit von COBLENTZ (1912), der mit einem relativ weit entwickelten Spektralphotometer die diffuse Reflexion einiger Blätter bis in den IR-Bereich maß und dabei erstmals einen hohen Reflexionsanteil im Nahen IR (950 nm) feststellte. Nicht zuletzt aufgrund seiner präzisen Beobachtungen war es WILLSTÄTTER & STOLL (1918) möglich, ihre Theorie zum Wegeverlauf der Sonnenstrahlung in Blättern vorzustellen. Darauf wird weiter unten noch eingegangen werden. POKROWSKI (1925) verwendete bei seinen Reflexionsmessungen an Blättern verschiedener Baumarten vermutlich als Erster Magnesiumoxid als Referenzstandard, was aufgrund der hohen Albedo dieser Substanz, die mit 95 bis 98 Prozent der Einstrahlung dem theoretischen Lambert-Reflektor ziemlich nahe kommt, bis heute beibehalten worden ist.

Unter Berücksichtigung dieser Resultate und bei dem raschen Fortschritt in der technologischen Entwicklung waren zunehmend genauere Messungen möglich, wie die Arbeiten von LASAREFF (1927), SHULL (1929), SEYBOLD (1932), SCHANDLER & KAEMPFFERT (1933), SEYBOLD (1933 a, b und c), SEYBOLD & BRAMBRING (1933) und SEYBOLD & WEISSWEILER (1942 a und b sowie 1943) zeigen.

SHULL ist wohl zuzuerkennen, daß er erstmals den Einfluß von Schadwirkungen (Mehltaubefall, chlorotische Verfärbungen) auf die spektralen Reflexionseigenschaften von Blättern meßtechnisch erfaßte.

SEYBOLD (1932) schreibt in seinen einleitenden Worten: "Die Kenntnis der optischen Eigenschaften der Laubblätter ist für die Analyse vieler stoffwechsel- und reizphysiologischer Prozesse von grundlegender Bedeutung". All diese Studien waren, wie bereits

bemerkt, in ihrer Zielsetzung jedoch nicht darauf ausgerichtet, optische Daten hinsichtlich der Differenzierbarkeit von Pflanzenarten oder Zustandsformen zu erhalten. Ebenso wie die Ergebnisse von RABIDEAU et al. (1948), GATES & TANTRAPORN (1952) und GATES et al. (1965) fanden sie aber in späteren Jahren zusätzliche Beachtung bei der Erforschung der Zusammenhänge zwischen den Reflexionseigenschaften der Vegetation und deren Abbildung auf Fernerkundungsaufzeichnungen. In der Folgezeit waren es insbesondere GAUSMAN und seine Mitarbeiter, welche ihre spektralphotometrischen Untersuchungen direkt mit Blickrichtung auf die Erarbeitung von Grundlagen zur Fernerkundung von Pflanzen und Pflanzenschäden ausrichteten.

II.3.1.1 Prinzipien der Interaktion zwischen elektromagnetischer Strahlung und Blättern

Neben ihrer hervorragenden Bedeutung für den Stoffwechsel der Pflanzen und ihrer großen Oberflächensummen vermitteln die Blätter zugleich den wichtigsten Informationsgehalt über Art und Zustand der Pflanzen.

Daher sollen hier einige Grundzüge der Wechselwirkungen zwischen dem von der Sonne eingestrahlten Licht und Blättern wiedergegeben werden.

Die spektralen Charakteristiken von Blättern werden von den folgenden vier Eigenschaften bestimmt :

1. der Struktur des Blattinneren, d.h. der anatomischen Anordnung der Gewebe und Zellen. Sie ist teilverantwortlich für die interne Streuung der auf das Blatt auftreffenden Strahlung. Aus der mittleren optischen Weglänge, welche sie im Blatt zurücklegt, resultieren bis zu einem gewissen Ausmaß die Anteile der spektralen Absorption, Reflexion und Transmission (WILLSTÄTTER & STOLL 1918, GATES et al. 1965, SINCLAIR 1968, ALLEN et al. 1969, GAUSMAN et al. 1970 d, SINCLAIR et al. 1973, TUCKER & GARRAT 1977);
2. der Zusammensetzung, Konzentration und Verteilung der Blattpigmente. Sie beeinflussen die Absorption von Strahlung aus dem ultravioletten und sichtbaren Spektralbereich (ALLEN et al. 1969, KNIPLING 1970, GAUSMAN et al. 1970, GATES 1970, WOOLLEY 1971);

3. dem Wassergehalt und der Verteilung des Wassers im Blatt. Diese Faktoren bestimmen die Strahlungsabsorption in den Wasserabsorptionsbanden des IR-Bereichs (ALLEN et al. 1969, KNIPLING 1970, GAUSMAN et al. 1970 und 1978, GATES 1970, WOOLLEY 1971); und

4. der Oberflächenbeschaffenheit des Blattes (Rauhigkeit, Behaarung, kutikuläre Wachsauflagerung). Sie ist für die spektrale Reflexion an der Blattoberfläche verantwortlich (BENNET & PORTEUS 1961, GATES 1970, WOOLLEY 1971, GAUSMAN et al. 1978).

Die Messung der Interaktionen zwischen Strahlung und Pflanzen wird im allgemeinen im Spektralbereich zwischen 400 oder 500 und 2 500 nm durchgeführt. Der Grund dafür liegt darin, daß etwa 90 % der einfallenden Sonnenenergie diesem Bereich zuzuordnen sind (DIRMHIRN 1964, KNIPLING 1970, u.a.). Bei Wellenlängen unterhalb von 400 nm und oberhalb von 2 800 nm verhält sich das Blatt nahezu wie ein schwarzer Körper; die Anteile der Reflexion und Transmission sind dementsprechend sehr niedrig (GATES & TANTRAPORN 1952, WONG & BLEVIN 1967).

Der Wellenlängenbereich zwischen 400 und 2 500 nm kann hinsichtlich der Interaktionen mit Blättern in drei Abschnitte aufgliedert werden:

- a) das sichtbare Licht (400 bis 700 nm). Hier findet eine hohe Absorption durch die Blattpigmente (hauptsächlich das Chlorophyll) statt; ein relatives Reflexionsmaximum bei etwa 550 nm läßt dem menschlichen Auge die Pflanzen grün erscheinen
- b) das Nahe Infrarot (700 bis 1 300 nm). Infolge nahezu vollständig fehlender Absorption ist dieser Bereich durch hohe, etwa gleich große Reflexions- und Transmissionsanteile gekennzeichnet
- c) den Absorptionsbereich des Wassers (1 300 bis 2 500 nm). Die relativen Anteile von Reflexion, Absorption und Transmission werden hier in erster Linie durch die Menge des im Blatt vorhandenen Wassers bestimmt.

Das Prinzip des Wegverlaufes der Lichtstrahlung in Blättern kann noch heute weitgehend durch die von COBLENTZ (1912) und insbesondere WILLSTÄTTER & STOLL (1918) aufgestellte Theorie erklärt werden: nachdem die Strahlen die Epidermiszellen und das Pali-

sadenparenchym passiert haben, treten sie in das Schwammparenchym ein, wo die Zellen locker gepackt sind und dazwischen unregelmäßig verstreut Lufträume liegen. Bei der Reflexion an Zellwänden und Brechung beim Übertritt von Luft in die hydratisierten Zellwände und umgekehrt kommt es zu Streuungen im Blattinneren. Der nicht durch Pigmente absorbierte Strahlungsanteil tritt je nach seinem Wegeverlauf wieder auf der Seite des Lichteinfalls aus und ist damit dem reflektierten Anteil zuzurechnen, oder er verläßt das Blatt auf der entgegengesetzten Seite (Transmission). Ergänzend wies GAUSMAN (1973 a und b, 1977 a) darauf hin, daß auch zwischen Mittellamelle und Zellwand, Cytoplasmamembran und Protoplasma sowie zwischen Kernmembran und Kerninhalt Reflexions- bzw. Brechungsunterschiede bestehen, die nach KUMAR & SILVA (1973) signifikant zu den Reflexionseigenschaften eines Blattes beitragen.

SINCLAIR et al. (1973) stellten diese Erklärungen teilweise in Frage, denn die an der ventralen Seite bifazialer Blätter sowie bei Wasserverlust zu beobachtende höhere spektrale Reflexion im Nahen Infrarot wird damit nicht belegt. Ihre Untersuchungen ergaben, daß die blattinterne, durch Brechung und Reflexion verursachte Streuung als Funktion der Zellwanddicke zu bezeichnen ist. Zudem vertreten sie die Ansicht, daß die Zellwand aufgrund ihrer fibrillären Struktur auftreffendes Licht zu einem wesentlich größeren Teil diffus bricht und reflektiert als allgemein angenommen worden war. Die Gesamtreflexion eines Blattes würde also durch die Anzahl und damit die Summe der Dicke der Zellwände bestimmt, auf welche die Strahlung auftrifft bzw. die sie durchdringt. Mit dieser sogenannten "Diffuse Reflexions-Hypothese" sind auch die oben angeführten Widersprüche zu WILLSTÄTTER & STOLL-Theorie zu erklären.

Die Kombination beider Annahmen führt zu einer befriedigenden Erklärungsmöglichkeit für die Reflexionseigenschaften von Blättern sowohl im sichtbaren als auch im Nahen IR-Bereich des Lichtes.

Unter Anwendung der hiermit in knapper Form zusammengestellten Erläuterungen (Einzelheiten s. SANWALD et al. 1979) können Veränderungen im spektralen Reflexionsverhalten von Pflanzen verstanden werden.

Diese sind während der Entwicklung der Pflanzen zu beobachten; bis zur vollständigen Ausdifferenzierung der Blätter und damit des Zellgefüges ändert sich beispielsweise die Reflexion im Nahen IR ständig (GAUSMAN et al. 1969, 1970 c, 1971 b, 1971 c, 1973 d).

Schäden, die in Störungen des Pigmenthaushaltes resultieren, wie Nährstoffmangel oder -überschuß, toxischer Salzgehalt des Bodens und einige biotische Einwirkungen (z.b. manche Viruskrankheiten), manifestieren sich im sichtbaren Spektralbereich und im Nahen IR (MYERS 1970, CARDENAS et al. 1970, AL-ABBAS et al. 1972). Wassermangel und zahlreiche biotische Schädwirkungen äußern sich oft schon im Angangsstadium in einer Kollabierung der Zellen des Schwammparenchyms; daraus resultieren veränderte Reflexionswerte im Bereich des Nahen IR (GATES 1970, GAUSMAN et al 1970 d, 1973 d, GAUSMAN 1974). COLWELL (1970) betonte, daß insbesondere dieser Spektralbereich zu Aussagen über den Vitalitätszustand von Pflanzen herangezogen werden kann.

II.3.2 Die spektralen Reflexionseigenschaften von Pflanzen im Bestand

Bei der Fernerkundung landwirtschaftlicher Pflanzenbestände wird - von Strauch- und Baumkulturen abgesehen - bei den üblichen abbildungsgeometrischen Maßstabsverhältnissen nicht die Reflexion der einzelnen Pflanze und weniger noch die des einzelnen Blattes per se, sondern stets diejenige einer Mehrzahl von Pflanzen registriert. Ist eine geschlossene Bestandesdecke vorhanden, so ist deren aufgezeichnete Reflexion als das Integral der Reflexion der Einzelpflanzen zu bezeichnen; sind Bodenanteile sichtbar, so unterscheiden sich diese aufgrund ihrer andersartigen spektralen Reflexionseigenschaften von der über die Pflanzreihen oder Pflanzengruppen integrierten Reflexion.

Um Aussagen zu den quantitativen Reflexionseigenschaften von Pflanzenbeständen zu machen mit dem Ziel, ihre Abbildung auf Fernerkundungsaufzeichnungen zu bestimmen und daraus Unterscheidungsmerkmale zwischen einzelnen Arten oder Zustandformen abzuleiten, genügt die Kenntnis der spektralen Blattreflexion allein - so wertvolle Grundaussagen sie auch beinhaltet - nicht. Dies wurde schon von HILDEBRANDT (1962) betont. Die Winkelstellung der an der Reflexion beteiligten Blätter, nach oben exponierte Stengel- und Blattstiel-

anteile, die Stellung der Blätter an der Sproßachse zueinander, Schattenräume, die Sonnenhöhe, sowie der azimutale Beobachtungswinkel und der Neigungswinkel des Sensors in summa üben einen wesentlichen Einfluß auf die Abbildungscharakteristik von Einzelpflanzen und Pflanzenbeständen aus.

Die Reflexionseigenschaften von Vegetationsoberflächen können im Freiland mit Hilfe des Spektroradiometers gemessen werden. Dabei wird die durch eine begrenzte Eintrittsöffnung empfangene Strahlung durch ein optisches Filter (Interferenzverlaufsfilter oder ein Filterrad mit Einsätzen definierter spektraler Transmission) spektral zerlegt. Die Energieanteile der einzelnen Spektralbereiche werden von hochempfindlichen Detektorsystemen gemessen und über Ausgabeeinheiten registriert. Eingehende Gerätebeschreibungen finden sich bei LEAMER et al. (1973), ROBERTS & GIALDINI (1973), BRACH (1973), BRACH (1974) sowie BRACH et al. (1977).

Um einen repräsentativen Flächenausschnitt zu erfassen, wird das Gerät an einen Auslegermast montiert und mit diesem in eine von der Aufgabenstellung und den technischen Möglichkeiten bestimmte Höhe über Grund gebracht. Damit können ähnliche Verhältnisse wie beim Befliegungsvorgang geschaffen werden.

Messungen dieser Art sind für die Erfassung spektraler Objektsignaturen)¹ von großer Bedeutung. Mit den dabei erhaltenen Daten können, in Kombination mit spektralphotometrischen Meßresultaten, Art und Zustandekommen der Inhalte von Fernerkundungsaufzeichnungen untersucht und erklärt werden.

Eine zusammenfassende Übersicht zu dem Problemkreis der spektralen Reflexionseigenschaften bewachsener Oberflächen geben HILDEBRANDT (1976) und SUITS (1977).

Mit den Änderungen der spektralen Signatur von Pflanzenbeständen in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe, dem Beobachtungszimut und dem Beobachtungzenitwinkel befaßten sich SUITS (1971 und 1972),

)¹ Mit der Definition dieses Begriffes beschäftigt sich gegenwärtig noch die Arbeitsgruppe "Spektrale Objekteigenschaften" der Kommission VII der IGP. Vorläufige Definitionen gaben BOEHNEL (1977 a) und KRIEBEL (1978 a).

KRIEBEL et al. (1975), KADRO & FISCHER (1976), BOEHNEL (1977), FISCHER (1977), GUYOT (1977) und KADRO (1977). Theorie, Vorgehen und Resultate ihrer Messungen der spektralen Reflexionseigenschaften verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen beschreiben ALLEN & BROWN (1965), STEINER (1966), KRIEBEL (1973, 1977 und 1978), KANEMASU (1974) sowie KOEPKE & KRIEBEL (1978).

Den Arbeiten von KANEMASU (1974), TUCKER (1976), SUITS (1977) und BRACH et al. (1977) ist zu entnehmen, daß der Spektralbereich zwischen 400 und 1 100 nm genügend Informationen sowohl über die charakteristischen Reflexionseigenschaften einzelner Feldfrüchte als auch bezüglich darin auftretender Schadwirkungen enthält. Dieser Wellenlängenabschnitt erfaßt zwar einerseits nicht mehr den Bereich der Wasserabsorptionsbanden bei 1 450, 1 950 und 2 300 nm, der im Spektralphotometer noch gemessen werden kann und Aufschlüsse über den relativen Wassergehalt von Pflanzenteilen liefert (OLSON & RHODE 1970), andererseits aber ist aus den Meßresultaten dieser Autoren die praktische Schlußfolgerung abzuleiten, daß zwischen etwa 950 und 1 100 nm keine wesentlichen Zusatzinformationen über den Vitalitätszustand von Pflanzen gewonnen werden können und somit der IRC-Film mit seiner spektralen Sensibilität zwischen 520 nm (bei Verwendung des üblichen Gelbfilters) und ca. 920 nm als Sensor für Vegetationsbestände brauchbar ist. Zwar ist seine spektrale Auflösungskapazität wesentlich geringer als diejenige von Photometern, Spektroradiometern und Multispektralscannern, und die von ihm gespeicherten Daten können nur über Zwischenstufen wie Mikrodensitometer oder Zeilenabtaster (Trommel-scanner) digitalisiert und durch elektronische Rechenanlagen verarbeitet werden; das beeinträchtigt aber keineswegs seine Anwendbarkeit im Rahmen der Problemstellungen, die eine rasche, präzise und kostengünstige Informationsgewinnung erfordern.

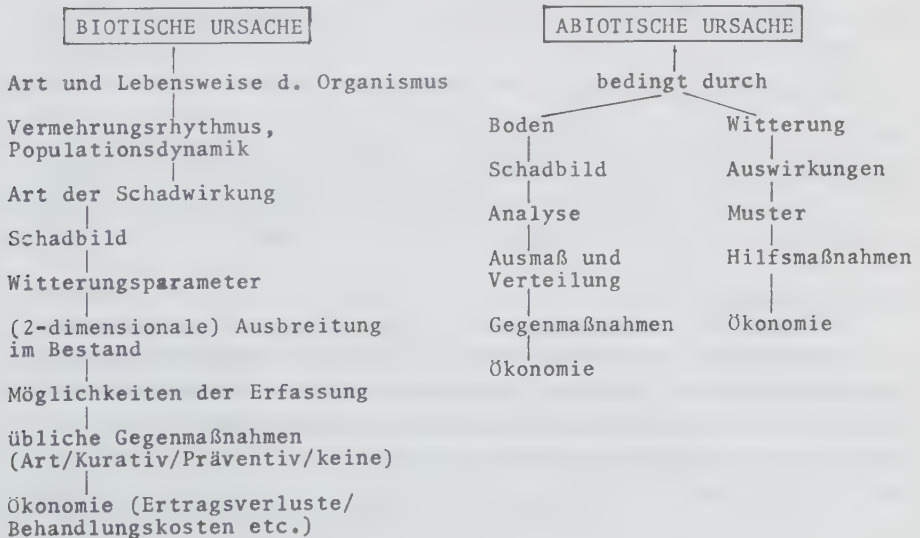
II.3.3 Wertung und Schlußfolgerungen

Auf die Möglichkeiten und Grenzen des Luftbildeinsatzes in verschiedenen Bereichen der Landwirtschaft hatte bereits COLWELL (1960) hingewiesen, allerdings ohne Berücksichtigung des damals noch nicht im zivilen Gebrauch verwendeten IRC-Films. Zu dessen Anwendungen unter landwirtschaftlich-ökologischen Aspekten gab GIRARD (1974) eine vorläufige Übersicht.

In vorangegangenen Abschnitten (II.1 und II.2) wurde anhand zahlreicher Beispiele aus der Literatur ausführlich auf die Einsatzmöglichkeiten der IRC-Luftbildfotografie in Pflanzenproduktion und Pflanzenschutz hingewiesen. In vielen der zitierten Arbeiten hatte es sich gezeigt, daß diese Methodik, sofern sie von begleitenden Datenerhebungen unterstützt wird, bei zumindest gleicher Aussagegenauigkeit im Vergleich zu konventionellen Verfahren erhebliche Einsparungen an Zeit und Kosten mit sich bringen kann. Es ist allerdings auffallend, daß nur relativ wenige Autoren konsequente Grundlagenforschungen, wie sie auch in der Einleitung zu dieser Arbeit gefordert werde, in Verbindung mit ihren Untersuchungen durchgeführt oder wenigstens angeregt haben. Zu diesen zählen THOMAS et al. (1967), HART & MYERS (1968), GAUSMAN et al. (1970 a, 1970 c, 1970 d, 1977 a und 1977 b), WIEGAND et al. (1972) sowie TOTTERDELL & RAINS (1973).

In Bezug auf eine Versuchsanstellung zur Überprüfung der Möglichkeiten, Pflanzenschäden mit Hilfe der Fernerkundung zu erfassen, sind aus dem bisher gesagten die folgenden Schritte abzuleiten (für das Beispiel einer bestimmten Schadwirkung in einer bestimmten Kultur):

1. Erarbeitung der agrarbiologischen Grundlagen (theoretisch und im Gelände)



2. Bestimmung der Reflexionseigenschaften von Blättern geschädigter und nicht geschädigter Pflanzen der Kultur
 - Messung (Quantifizierung) im Spektralphotometer
 - Anatomische Ursachen von Reflexionsunterschieden
 - Physiologische Ursachen von Reflexionsunterschieden
3. Bestimmung der Reflexionseigenschaften geschädigter und nicht geschädigter Pflanzen im Bestand
 - Evaluierung von Wuchshöhe, Blatt- und Sproßachsenstellung, Bewirtschaftungsform, Bodenbedeckung
 - Bestimmung des Blattflächenindex
 - terrestrische Fotografie
 - spektroradiometrische Messungen
4. Schlußfolgerungen zur Erfäßbarkeit der Schadwirkung durch Fernerkundungstechniken. Im Falle einer positiven Aussage,
5. Durchführung von Probefliegungen
6. Bild- (Daten-) Auswertung bezüglich
 - eindeutiger Identifizierbarkeit der betreffenden Kulturart
 - Identifizierbarkeit der Schadwirkung, Differenzierungsmöglichkeit von anderen Schadwirkungen
7. Optimierung der Befliegungen (bzgl. Zeitpunkt, Häufigkeit, Maßstabsverhältnis)
8. Prüfung der Wirtschaftlichkeit gegenüber konventionellen Verfahren
9. Empfehlung (Einsatzplan für die Praxis)

Durch ein derartiges Vorgehen wird bei einer gegebenen Aufgabenstellung zum einen wissenschaftlichen Erfordernissen Genüge getan, und zum andern kann vermieden werden, daß unrealistische Erwartungen bezüglich der Praktikabilität einer Methodik geweckt werden.

II.4 Problemstellung

Die überwiegende Anzahl der Untersuchungen zur Anwendung der Fernerkundung bei der Erkennung landwirtschaftlicher Pflanzenschäden sind bisher im außereuropäischen Ausland durchgeführt worden. Wie schon anfänglich erwähnt, sind diese Verfahren in Deutschland dagegen in der Forstwirtschaft - in erster Linie zur Bestandesinven-

tur - schon seit Ende der zwanziger Jahre gebräuchlich. Dement-sprechend waren es auch Forstwissenschaftler, welche, angeregt durch die ersten erfolgreichen Untersuchungen aus den USA (NORMAN & FRITZ 1965), erstmals auf die Möglichkeiten des IRC-Films zur Erfassung von Vegetationsschäden hinwiesen (HILDEBRANDT 1966, WOLFF 1966, HILDEBRANDT & KENNEWEG 1968 und 1970, HILDEBRANDT 1973), nachdem FRICKE & VÖLGER (1965) nach ersten Versuchen mit dem damals neuartigen Material schon ähnliche Vermutungen aufgestellt hatten. Wie die Arbeiten von KENNEWEG (1972), KADRO (1973), KADRO & KENNEWEG (1975), TZSCHUPKE (1974), ROHDE (1977) und CAGIRICI (1978) zeigen, wurden auf dem forstlichen Sektor in der Budnesrepublik inzwischen wichtige Fortschritte bei der Anwendung des IRC-Materials zur Schaderkennung erzielt.

Im Bereich unserer Landwirtschaft wurde diese Technologie für solche Zwecke erst in dem Moment in Erwägung gezogen, als KÖSTERS im Jahre 1974 den Gedanken faßte, ihre Möglichkeiten bei der Erfassung und Inventarisierung von Nematodenschäden in Zuckerrüben untersuchen zu lassen.

Die durch den Rübenzystennematoden *Heterodera schachtii* Schmidt verursachten Schäden haben innerhalb etwa der letzten zehn Jahre in mehreren wichtigen Zuckerrübenanbaugebieten unseres Landes in bedeutendem Ausmaß zugenommen. Da aus betriebswirtschaftlichen Gründen (Transportkosten etc.) die Anbauintensität in der nächsten Umgebung von verarbeitenden Werken (Zuckerfabriken) möglichst hoch sein soll, werden die vorhandenen Produktionsflächen so intensiv wie möglich mit Zuckerrüben bestellt. *H. schachtii* ist als parasitierender Wurzelnematode in seinen Lebenserfordernissen an Wirtspflanzen gebunden, und so findet er aufgrund der engen Fruchtfolgen ein reichhaltiges Nahrungsangebot vor und vermehrt sich rapide)¹.

Die durch sein Auftreten verursachten Ertragsverluste sind bedeutend und wachsen ständig an; wirtschaftliche und zugleich effektive Gegenmaßnahmen waren bis vor kurzem nicht bekannt. Erst mit der Entwicklung eines neuartigen Applikationsgerätes für bodenwirksame Chemikalien hohen Dampfdrucks sind Möglichkeiten dazu geschaffen worden. Bei den immer noch verhältnismäßig hohen Kosten dieses Ver-

)¹ Näheres zur Biologie etc. des Rübenneematoden s. III. ff

fahrens und der starken Toxizität der Nematizide ist zu beachten, daß sie nur dort eingesetzt werden, wo ein entsprechender Befall vorliegt.

Aufgrund langjähriger Beobachtungen gelangten KÖSTERS & STIEMERLING (1975) zu der Ansicht, daß die bisher angewendeten Methoden zur Inventarisierung des Nematodenauftretens durch die Untersuchung von Bodenproben möglicherweise nicht ausreichend genaue Resultate erbringen, und zudem der finanzielle Aufwand dafür relativ hoch ist. Aus diesen Gründen wurde der Versuch unternommen, die Tauglichkeit der Luftbildfotografie zur Erfassung von Nematodenschäden in Zuckerrüben zu überprüfen.

Über die im Rahmen dieser Aufgabenstellung durchgeführten Arbeiten und ihre Ergebnisse wird im folgenden berichtet werden.

III DER RUBENZYSTENNEMATODE *HETERODERA SCHACHTII* SCHMIDT

III.1 BIOLOGIE

III.1.1 Systematische Eingliederung

Art:	<i>Heterodera schachtii</i> SCHMIDT (1871); erste Beschreibung durch SCHACHT (1859)
Familie:	Heteroderidae
Oberfamilie:	Tylenchoideae
Ordnung:	Tylenchidae
Klasse:	Nematoda
Stamm:	Nemathelminthes

III.1.2 Herkunft und geographische Verteilung

Die ursprüngliche Heimat des obligaten Pflanzenparasiten *H. schachtii* liegt in den originären Verbreitungsarealen seiner Wirtspflanzen. Zu diesen zählen insbesondere die Wildformen der Betarübe (*Beta vulgaris* L.), ebenso Pflanzen der Gattung *Brassica*, (wazu der Raps (*Br. napus* L.), die Rüben (*Br. rapa* L.) und die Wildform *Br. campestris* L. gehören; sowie der Senf (*Sinapis alba* L. und *S. arvensis* L.). Die Vorfahren unserer Kulturrüben stammen aus den zentral- bis vorderasiatischen Steppengebieten und den vom Golfstrom erwärmten atlantischen Küstenregionen Westeuropas; ein weiteres Herkunftsgebiet wird im Bereich des westlichen Mittelmeeres und auf den Kanarischen Inseln vermutet (KAMPFE 1962). Diese Herkunftsareale gelten im wesentlichen auch für die anderen genannten Pflanzen.

Ein Relikt der Herkunft aus warmen Zonen ist die unter unseren mitteleuropäischen Klimaverhältnissen zu beobachtende deutliche Steigerung der Aktivität dieser Tiere bei Temperaturen über 25°C, die sich in einer Beschleunigung der Entwicklung ausdrückt (s.u. Tab. 2). Dadurch ist während überdurchschnittlich warmer Sommer ein stark erhöhter Populationszuwachs zu erwarten.

Heute ist das Rübenzystenälchen in sämtlichen Rübenbaugebieten der Alten und Neuen Welt anzutreffen.

III.1.3 Entwicklungsbiologie

Die Entwicklung vom befruchteten Ei bis zum adulten Tier vollzieht sich in fünf Stufen mit vier Umwandlungen (Häutungen).

Die befruchtete Eizelle, welche einen diploiden Chromosomensatz von 18 Chromosomen enthält, entwickelt sich im Uterus unter Ausbildung einer Eihülle zum Ei. Ein weibliches Tier bildet zwischen 10 und 600 Eier; durchschnittlich sind es 300. Innerhalb des Eis finden anschließend fortwährend Segmentierungen der Eizelle statt, und am Ende dieser Furchungsvorgänge ist das erste Larvenstadium erreicht (Abb. 1).

Kurz vor Beginn der Häutung zum zweiten Larvenstadium, die noch in der Eischale stattfindet, beginnt bereits die Differenzierung der Gonaden. Nach dieser Häutung schlüpfen die Tiere, die auch als präparasitäre Larven bezeichnet werden, aus den Eiern und befinden sich damit im Innern des Dauerorgans der Vermehrung, der sogenannten Zyste, welche sie - wiederum auf äußere Stimuli hin - durch deren natürliche Öffnungen verlassen. Sie sind bereits mit einem voll ausdifferenzierten Stech- und Saugapparat ausgerüstet und bewegen sich in dem Adhäsionswasserfilm an den Bodenpartikeln auf die Wurzeln der Wirtspflanze zu. Dabei sind sie also an einen bestimmten Minimalgehalt an Feuchtigkeit gebunden; ist der Boden so stark ausgetrocknet, daß auch kein Adhäsionswasser mehr vorhanden ist, dann können die Tiere nicht zu den Wurzeln gelangen.

In die Wurzeln können sie prinzipiell überall eindringen, bevorzugen aber die Spitzen junger Wurzeln. Der Grad des Eindringens ist unterschiedlich; von vollständig endoparasitisch bis nahezu ektoparasitisch sind alle Formen möglich. Am häufigsten werden semiendoparasitische Larven angetroffen (STEELE 1971).

Nach ein bis zwei Wochen wandeln sich die präparasitären Larven durch eine weitere Häutung um. Unter Beibehaltung der Körperlänge nimmt der Durchmesser zu, wodurch sich ihre Gestalt zylinderförmig ausprägt. Außerdem beginnt die Differenzierung des Geschlechtsapparates. Schon wenige Tage später erfolgt die Häutung zum vierten Larvenstadium (Abb. 2 und 3).

Während dieses Stadiums schwellen die Weibchen weiter an, werden zunächst flaschen-, dann zitronenförmig und durchbrechen schließlich aufgrund des beträchtlichen Volumenzuwachses mit dem Abdomen

die Wurzelrinde. Das Kopfende und eine verlängerte Halsregion verbleiben im Wurzelinneren. Innerhalb weniger Tage wird die Ausbildung des Geschlechtsapparates abgeschlossen; die Tiere haben den adulten Zustand erreicht.

Die Männchen, welche dieses Stadium mit einer letzten Häutung abschließen, stellen danach die Nahrungsaufnahme ein und verlassen das Wurzelinnere, um die Weibchen aufzusuchen. Bald nach der Begattung sterben sie ab.

Im Uterus werden innerhalb etwa eines Monats Eier ausgebildet. Die weiblichen Tiere sterben ab, ihre abdominale Cuticula bleibt jedoch erhalten und bildet als sogenannte Zyste eine feste dauerhafte Schutzhülle. Solange sie sich noch an der Wurzel befindet, ist sie von einer weißen, subkristallinen, aus Uterussekreten bestehenden dünnen Schicht bedeckt, die nach dem Abfallen oder Abstreifen der Zyste von der Wurzel im Boden rasch verloren geht, wodurch die unter dem Einfluß von Polyphenoxydasen braun gefärbte Zellwand zum Vorschein kommt. Bevor jedoch mit der Verhärtung der Zellwände die Zystenbildung einsetzt, werden in den sogenannten Eiersack - eine schleimartige, die Vulvaregion umgebende Masse - bis zu 200 Eier abgegeben (Abb. 3). Diese spielen bei der Massenvermehrung der Nematoden eine sehr wichtige Rolle, da aus ihnen sehr bald schon Larven schlüpfen, welche wiederum das Wirtsgewebe befallen und eine weitere Generation bilden.

Außerdem können unter günstigen Umweltbedingungen auch aus den frisch gebildeten Eiern im weiblichen Tier sofort Larven schlüpfen, die ihren Lebenszyklus in ca. 30 Tagen vollenden.

Somit kann innerhalb einer Vegetationsperiode aus einer geringen Ausgangspopulation eine sehr große Anzahl neuer Tiere entstehen (RASKI 1950). Die Dauer der Entwicklungszyklen beträgt je nach den äußeren Bedingungen 4 bis 8 Wochen (WALLACE 1963).

Abschließend zu diesem Abschnitt ist noch anzumerken, daß die Larven in der Zyste durchschnittlich etwa ein Jahr überleben können (GOLDEN & SHAFER 1960); die Zysten bringen laut THORNE (1923) durchschnittlich sechs Jahre lang aus ihrem Inhalt Larven hervor.

III.1.4 Ökologische Aspekte

Unter dem Begriff der Ökologie sind die Wechselbeziehungen zwischen



Abb. 1

Furchung und Differenzierung des 1. Larvenstadiums (aus THORNE 1961)

Abb. 2

Entwicklung des männlichen Tieres: v.l.n.r. Larvenstadien 2, 3 und 4 (aus THORNE 1961)

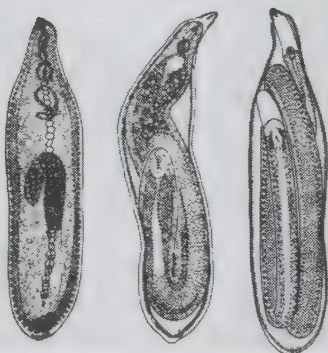


Abb. 3

Entwicklung des weiblichen Tieres: v.l.n.r. Larvenstadien 2, 3 und 4. Das adulte Tier differenziert die Eier bereits aus; s.a. nach außen abgegebene Eier (aus THORNE 1961)



Lebewesen und ihrer belebten und unbelebten Umwelt zusammengefaßt. Die belebten und unbelebten faktoriellen Eigenschaften und Bestandteile des Bodens stellen die Umwelt des Rüben nematoden dar, dessen Lebensvorgänge in der Wurzelregion der Wirtspflanzen, etwa zwischen 5 und 40 cm Bodentiefe, ablaufen.

III.1.4.1 Temperatur und Feuchtigkeit

Aufgrund seiner geographischen Herkunft ist *H. schachtii* in seinem Auftreten von bestimmten Minimaltemperaturen abhängig; d.h. sein Entwicklungszyklus kann erst oberhalb einer bestimmten Temperaturoptima gelten

- für das Schlüpfen der Larven aus den Zysten und ihre Beweglichkeit im Boden: 15°C (WALLACE 1963);
- für die Vermehrung, d.h. Entwicklung an der Wirtspflanze, Kopulation und Ausbildung der Eier: 27,5°C (LADIGYNA 1960, THORNE 1961, KÄMPFE 1962);
- für das Schlüpfen der Larven aus den Eiern (bei Ausbildung neuer Generationen während der Vegetationszeit): 25°C (DECKER 1969).

H. schachtii ist also ein eurythermes Lebewesen, dessen Optimalreaktionen bei Temperaturen zwischen 25 und 30°C stattfinden (KÄMPFE 1962).

Der Einfluß der Temperatur auf die Dauer eines Reproduktionszyklus ist nach den Laboruntersuchungen von LADIGYNA (1960 und 1963) in Tab. 2 zusammengefaßt.

Tab. 2: Abhängigkeit der Entwicklungsdauer des Rüben nematoden von der Temperatur (n. LADIGYNA 1960 und 1963)

Temperatur (°C)	Entwicklungszeit (Tage)
17,8	57
20	44
23	33
26	27
27	25
29	23

Da unter Freilandverhältnissen noch zahlreiche weitere Faktoren die Entwicklungsgeschwindigkeit maßgeblich beeinflussen, dürfen die genannten Zahlen sicherlich nicht als absolut gültig angesehen werden. So gibt WALLACE (1963) für 19°C eine Reproduktionsdauer von 31 Tagen an. Dennoch wird der grundsätzliche Einfluß der Temperatur auf die Vermehrungsgeschwindigkeit aus diesen Daten klar ersichtlich.

Wie bereits angedeutet, spielt die Bodenfeuchtigkeit insbesondere bei der Bewegung der präparasitären Larven zum Wirt eine bedeutende Rolle. Die Tiere schlängeln sich in dem den Bodenteilchen anhaftenden Wasserfilm durch die Poren hindurch zur Wurzel. In völlig ausgetrockneten Bodenschichten ist keine Fortbewegung möglich, da der notwendige Wasserfilm fehlt. Sind andererseits die Poren ganz mit Wasser gefüllt, so ertrinken die Tiere zwar nicht, können aber auch nicht schwimmend zu ihrem Ziel gelangen. Optimale Bedingungen liegen vor, wenn sich nach Niederschlägen die Bodenschichten wieder mit Luft zu füllen beginnen. Solche Verhältnisse sind in unserer Klimazone im April und Mai gegeben, und zusammen mit den um diese Zeit im allgemeinen ebenfalls erfüllten Temperaturbedingungen wird dies als Hauptursache für das Ausschwärmen der Larven in diesem Zeitraum angenommen (WALLACE 1955).

Aus den Laboruntersuchungen von KÄMPFE (1962) kann geschlossen werden, daß länger anhaltende Trockenperioden auch unter Freilandbedingungen zu Minderungen der Populationszuwachsrate führen können, da die durch Wassermangel beeinträchtigten physiologischen Abläufe im Körper der Tiere deren Aktivitäten hemmen oder gar ihren Tod verursachen können. Der Inhalt im Boden befindlicher Zysten dagegen wird weder durch Trockenheit noch durch Nässe geschädigt.

III.1.4.2 Bodenart und Säuregrad

Auch Porengröße und Durchlüftung des Bodens sind für die Beweglichkeit der präparasitären Larven von großer Bedeutung. WALLACE (1955) beobachtete, daß in Böden mit geringem Porenvolumen und schlechter Durchlüftung die Nematodenaktivität geringer ist als in Böden gleicher Zusammensetzung, aber günstigerer Struktur und Textur. Abgesehen davon, daß sehr schwere Böden einen ungünstigen Einfluß auf Vermehrung und Verbreitung der Tiere ausüben,

konnte bislang keine Korrelation zwischen Bodentypen und Nematodenauf-treten festgestellt werden.

SIMON (1959) fand eine Korrelation zwischen dem pH-Wert des Bodens und der Befallsintensität. Danach sind leicht alkalische Böden stärker befallen als saure oder neutrale Böden. Die Bedeutung dieser Aussage ist allerdings nicht sehr hoch einzustufen, da Zuckerrüben auf leicht alkalischen Böden besser gedeihen und die Ursache für höhere Populationsdichten von *H. schachtii* eher in dem verbesserten Nahrungsangebot zu sehen sind.

III.1.4.3 Wirtspflanzen, Feindpflanzen, Neutralpflanzen

Schon bald nachdem *H. schachtii* als Parasit der Zuckerrübe erkannt worden war, wurden Kulturpflanzen und Unkräuter auf ihre Wirtseigenschaften hin untersucht und je nach den Wechselbeziehungen zwischen ihnen und dem Rüben-nematoden einer der in der Überschrift genannten Pflanzengruppen zugeordnet und tabellarisch zusammengestellt (n. Wilson 1954 und THORNE 1961). Diese Listen, während der achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts veröffentlicht, waren zwar nicht vollständig, umfaßten aber die wichtigsten Kulturpflanzen und Unkräuter. Daß sie teilweise auch fehlerbehaftet waren, wurde erst etwa siebzig Jahre später festgestellt; zuvor waren Fehlschläge bei bestimmten Fruchtfolge-maßnahmen, die zur Nematodenverminderung dienen sollten, anderen Ursachen zugeschrieben werden.

Ein bis heute nicht zu fassendes Problem liegt in der ständigen Möglichkeit der Entstehung regionaler Biotypen der Nematoden, welche auch Pflanzen parasitieren, die nicht zu den Wirtspflanzen gerechnet werden.

III.1.4.3.1 Wirtspflanzen

Darunter sind solche Pflanzen zu verstehen, die *H. schachtii* als Nahrungsgrundlage dienen und an denen er seinen Reproduktionszyklus durchlaufen kann.

Anfang der 50er Jahre wurden neue Wirtspflanzenlisten nach den Untersuchungen von RASKI (1950 und 1952) sowie WINSLOW (1954) herausgegeben, welche die Aufstellungen aus dem vorigen Jahrhundert berichtigten und ergänzten. Sie umfassen 98 Pflanzenarten aus 9 Familien und 48 Gattungen. Darunter finden sich zahlreiche Ver-

treter u.a. der Familien *Cruciferae*, *Chenopodiaceae* und *Polygonaceae*, wobei von den Gattungen *Beta*, *Brassica* und *Rumex* nahezu sämtliche Arten vertreten sind.

Aufgrund der Anpassungsfähigkeit der Tiere an lokale Gegebenheiten können allerdings auch diese Zusammenstellungen keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. So fand MJUGE (1964), daß in Rußland auch Kartoffeln von *H. schachtii* parasitiert werden.

III.1.4.3.2 Feindpflanzen

Dieser Begriff faßt diejenigen Pflanzen zusammen, durch deren Wurzelexsudate das Schlüpfen der Larven aus den Zysten gefördert wird, ohne daß den Tieren jedoch Nahrung und Entwicklungsmöglichkeiten geboten werden. Die Folge ist eine Verminderung der Population. Luzerne, Mais, Roggen, Zichorie und Zwiebeln werden zum Anbau innerhalb von Fruchtfolgen als wirksame Feindpflanzen empfohlen.

Auch diese Liste ist mit Unsicherheitsfaktoren behaftet. Zudem wird der Einfluß von Feindpflanzen häufig überschätzt, da auch Einflüsse seitens der unbelebten Umwelt starke Schlüpfaktivitäten auslösen können, die dann allein den Feindpflanzen zugeschrieben werden.

III.1.4.3.3 Neutralpflanzen

Solche Pflanzen üben keinerlei Einfluß auf die Nematoden aus, d.h. sie können ihnen weder als Nahrungsquelle dienen noch stimulieren sie das Schlüpfen. Ihre Bedeutung in der Fruchtfolge wird darin gesehen, daß die aufgrund von Stimuli aus der unbelebten Umwelt geschlüpfte Tiere keine Nahrung vorfinden und absterben, wie es auch bei bewuchsfreier Brache der Fall ist.

Zusammenstellungen und Empfehlungen solcher Pflanzen sind ebenso kritisch zu betrachten wie bei den beiden anderen Gruppen. DECKER (1969) bezeichnet Kartoffeln, Möhren, Lupinen, Hanf und Mohn als Neutralpflanzen.

III.1.4.4 Faktoren, welche das Schlüpfen der Larven aus den Zysten beeinflussen

Die Gründe dafür, daß aus der Gesamtheit der in den Zysten befindlichen Eier immer nur wenige Larven schlüpfen, so daß sich inner-

halb der Zysten stets nur ein paar freie Larven aufhalten, sind bis heute ebensowenig geklärt wie die Prinzipien, welche bewirken, daß während jeder Vegetationsperiode immer nur ein Teil der Larven aus den Eiern schlüpft und die Zyste verläßt, während ein Rest sechs Jahre und mehr in den Eiern verbleibt.

Zahlreiche Untersuchungen bestätigen die Vermutung, daß äußere Einflüsse das Schlüpfen der Larven aus Eiern und Zysten maßgeblich beeinflussen. Bereits RADEMACHER & SCHMIDT (1933) prüften unter Laborbedingungen Hunderte von anorganischen und organischen Substanzen auf eine solche "Trigger"-Eigenschaft. In der Natur wirken vor allem bestimmte wasserlösliche Fraktionen von Wurzelexsudaten als Auslöser und Lockstoffe. Sie werden von den Wurzeln zahlreicher Pflanzen, auch von Nichtwirtspflanzen, ausgeschieden (WEISCHER & STEUDEL 1972). Wie bereits angedeutet, besitzen auch bodenchemische und -physikalische Faktoren bedeutende stimulierende Wirkungen. Neben Wärme und Feuchtigkeit schreibt WALLACE (1955) auch der Sauerstoffversorgung, d.h. der Porendurchlüftung, eine wichtige Rolle zu.

Über die Reizauslöser, durch welche die Nematoden zu den Wurzeln der Wirtspflanzen hingelangen, ist bisher nur wenig bekannt. Auch hierfür werden hauptsächlich Inhaltsstoffe von Wurzelexsudaten verantwortlich gemacht (WEISCHER & STEUDEL 1972). Außerdem könnte bei der Potentialdifferenz von bis zu 60mV, welche die (negativ geladene) Pflanzenwurzeln gegenüber ihrer Umgebung aufweisen, auch eine galvanotaktische Attraktion möglich sein, wie BIRD (1960) anhand seiner Laborversuche vermuten konnte.

III.1.5 Populationsdynamik

Die mit diesem Begriff gekennzeichnete Änderung der Dichte, der räumlichen Verteilung, des Alterklassenaufbaues, des Geschlechterverhältnisses etc. einer räumlich begrenzten Gesamtheit von Individuen einer Art im Zeitablauf wird von verschiedenen Faktoren beeinflußt. Als solche Einflußgrößen sind bei *H. schachtii* das Nahrungsangebot durch Wirtspflanzen, Temperatur-, Feuchtigkeits- und Bodenverhältnisse sowie natürliche Feinde in einer Reihenfolge mit abnehmender Bedeutung zu nennen.

Nach JONES (1956) steigt beim Anbau von Wirtspflanzen die Nematoden-

dichte unabhängig von der Größe der Ausgangspopulation auf einen Maximalwert an, der lediglich in seinem absoluten Betrag von Witterungs- und Bodenverhältnissen beeinflusst wird. Er konnte dies u.a. beim Anbau von Zuckerrüben bei unterschiedlichen Ausgangspopulationen in Gewächshaus- und Feldversuchen beobachten: in jedem Fall fand ein Populationszuwachs bis zu einer Maximaldichte statt. Schon zuvor hatte GOFFART (1953) ähnliche Resultate erhalten. Seine aus Gefäßversuchen gewonnenen Daten sind in Tab. 3 zusammengefaßt.

Tab. 3: Vermehrungsrate von *H. schachtii* bei verschiedenen Ausgangspopulationen im Gefäßversuch; Versuchsdauer (n. GOFFART 1953)

ursprüngliche Anzahl der Zysten je Versuchs- gefäß	Anzahl der neu- gebildeten Zysten je Versuchsgefäß	Vermehrungs- faktor
1	1 641	1 641
2	1 206	605
3	1 563	521
5	1 324	265
10	1 826	183
20	2 040	102
50	2 162	43

Diese Ergebnisse sagen aus, daß die Vermehrungsrate des Rübenzysten-nematoden bei gleicher Wirtspflanze, gleicher Größe des Wurzelsystems und gleichen Umweltbedingungen von der Größe der Ausgangspopulation abhängig ist, oder: die Vermehrungsrate ist unter diesen Umständen um so geringer, je größer die Ausgangspopulation ist, und umgekehrt.

Hat der Populationsdruck einen oberen Grenzwert erreicht, so wird bei *H. schachtii* durch eine überproportional gesteigerte Ausbildung männlicher Tiere ein weiterer Zuwachs, der letztlich in einem Zusammenbruch der Population enden müßte, verhindert (STEELE 1975).

Die Abnahmerate der Populationsdichte beim Anbau von Nichtwirtspflanzen oder bei Brache (jeweils Unkrautbekämpfung vorausgesetzt)

scheint von der Ausgangszahl der Tiere unabhängig zu sein. Nach WALLACE (1963) ist dabei mit einer jährlichen Abnahme der Zysten- bzw. Eianzahl um 40 bzw. 50 % zu rechnen. MORIARTY 1966 nimmt eine durchschnittliche Abnahme der Population um 30 bis 40 %, gemessen an der des Vorjahres, an und vermutet für die Folgejahre eine Abnahmesteigerung auf bis zu 60 %. Unter Zuhilfenahme dieser Werte kann bei bekannter Befallsdichte die Weite einer Fruchtfolge zur Verhinderung von nematodenbedingten Ertragsverlusten in etwa errechnet werden. Unter Praxisbedingungen können solche Berechnungen jedoch allenfalls als ungefähre Richtlinien gelten. Wenn danach beispielsweise eine Fruchtfolge eingerichtet wird, so kann - selbst bei angemessener Bodenbearbeitung, Düngung und Unkrautbekämpfung - im Zuckerrübenanbaujahr bei entsprechenden Witterungsverhältnissen eine sehr starke, zu Ertragsverlusten führende Nematodenvermehrung stattfinden.

Nach WEISCHER & STEUDEL (1972) hängt die Anzahl der pro Jahr gebildeten Generationen des Rübennematoden von der durchschnittlichen Bodentemperatur während der Vegetationsperiode der Wirtspflanzen ab (s.o. Tab. 2). In den temperierten Zonen Mitteleuropas entstehen jährlich zwei, während außergewöhnlich warmer Sommer drei Generationen.

III.2 SCHADWIRKUNG

III.2.1 Schadentstehung und Schadbild

Nachdem die Larven des 2. Stadiums die Wurzel der Wirtspflanzen erreicht haben, durchdringen sie mit ihrem Mundstachel die Rhizodermis und geben anschließend Speichelflüssigkeit in das Zellinnere ab. Diese Speichelflüssigkeit enthält das komplette Enzymbesteck eines Pflanzenparasiten: Amylase, Invertase und Pektinase sowie proteolytische Enzyme. Durch die enzymatische Auflösung von parallel und quer zur Wurzellängsachse gerichteten Zellwänden entsteht eine vielkernige Syncytie, aus deren Stoffproduktion das Tier seine Nahrung bezieht, bis es das adulte Stadium erreicht hat.

Die befallene Pflanze wird sicherlich durch den Entzug von Zellsäften etwas geschwächt, vor allem wenn sie sich im Jugendstadium befindet oder mit zahlreichen Nematoden besetzt ist, oder wenn sie bereits aufgrund äußerer Bedingungen unter unzureichender

Wasser- und Nährstoffversorgung leidet.

Weitaus gravierender ist allerdings der Schaden, der aus den Beeinträchtigungen des Wasser- und Nährstofftransportes durch die Riesenzellen resultiert. Die durch die relativ große Blattfläche der Zuckerrübe und deren Assimilationsrate bedingte hohe Transpirationsaktivität erfordert eine im Vergleich zu anderen Kulturpflanzen große Wassernachlieferungskapazität durch das Wurzelsystem. Wenn nun während der warmen Jahreszeit Witterungsperioden niedriger Luftfeuchtigkeit und hoher Temperatur eintreten, wodurch bei gleichzeitiger Abnahme des Wasservorrates im Boden die Transpiration erhöht wird, kann das Blattwerk nematodenbefallener Pflanzen schon bald nicht mehr ausreichend mit Wasser versorgt werden. Die Blätter verlieren ihren Turgor und schlaffen; je nach Befallsstärke und Wasserversorgung des Bodens bereits am ersten Tag einer Trockenperiode. Bei sehr starkem Befall können diese Symptome auch während gewöhnlicher Witterungsverhältnisse an niederschlagsfreien Tagen um die Zeit der höchsten Tagestemperatur beobachtet werden.

Schadsymptome sind auch am Wurzelkörper der Rüben festzustellen. Als typisch gilt der "Wurzelbart", d.h. die verstärkte Ausbildung von Seitenwurzeln, mit der die befallenen Pflanzen die Störung des Wasser- und Nährstofftransports auszugleichen versuchen. Eine wesentliche Verbesserung der Mangelsituation kann damit allerdings nicht erreicht werden, zumal auch die neugebildeten Wurzeln von Larven der zweiten Generation befallen werden. Aufgrund der Versorgungsbeeinträchtigungen und der resultierenden verminderten Assimilationskapazität bleibt die Hauptwurzel je nach Befallsstärke im Wachstum gegenüber nicht geschädigten Pflanzen zurück.

Die Verbreitung des Rübenzystennematoden erfolgt, wie bereits bemerkt, passiv. Im regionalen Maßstab ist dabei die bis vor einigen Jahren praktizierte Rückführung der bei der Rübenverarbeitung anfallenden Schmutzerde auf die Felder als Hauptursache der Ausbreitung in den einzelnen Anbaugebieten anzusehen. Im Bestand werden die Tiere vornehmlich bei Bewirtschaftungsmaßnahmen wie Bodenbearbeitung, Saat, etc. in der Bearbeitungsrichtung verschleppt. Aufgrund der geringen Eigenbeweglichkeit begrenzt sich ihr Auftreten auf Stellen im Feld, an die sie verschleppt wurden. Diese sogenannten Befallsnester können in ihrem Durchmesser durch die Aktivitäten der zwei-

ten Generation je nach der ursprünglichen Größe während eines Rübenanbaujahres um bis zu 2 m zunehmen (WALLACE 1963).

Die Ertragseinbußen, welche dem Landwirt durch den Rübenzysten-nematoden entstehen, können beträchtliche Ausmaße erreichen. Sie bestehen nicht nur in einer verminderten Erntemenge, sondern auch darin, daß während des Erntevorgangs das Entfernen der Blätter und des Hypokotyls ("Köpfen") von den klein gebliebenen Pflanzen stark erschwert wird. Außerdem bleiben in und an dem Wurzelbart erhöhte Mengen an Boden haften, was bei dem Verkauf der Rüben an die Zuckerfabrik ebenso wie auch das unvollständige Köpfen in einer geringeren Bezahlung resultiert. Neuerdings wird die Bezahlungsquote auch von der technologisch möglichen Zuckerausbeute je Gewichtseinheit Rohmaterial abhängig gemacht. Ob und inwieweit sich Nematodenbefall diesbezüglich negativ auswirkt, ist noch nicht endgültig geklärt. Da der Photosyntheseapparat der Blätter funktionstüchtig bleibt, vermutet WALLACE (1963) daß der Ablauf des Zuckermetabolismus qualitativ nicht beeinträchtigt wird.

Nach Decker (1969) können Ertragsbeeinträchtigungen durch *H. schachtii* dann auftreten, wenn Rüben, Kohlgewächse oder Kreuzblütler zu mehr als 25 % an der Fruchtfolge beteiligt sind. Die Schadwirkung ist korreliert zur Ausgangspopulation und den Witterungs- und Bodenverhältnissen, durch die sowohl das Wachstum der Kulturpflanzen als auch die Vermehrungsrate der Nematoden beeinflußt wird.

Durch die Bestimmung der Nematodenpopulation zu Beginn der Vegetationsperiode wird häufig versucht, Möglichkeit und Ausmaß einer durch den Schädling entstehenden Ernteeinbuße zu prognostizieren. Durch eine solche Bestimmung nach dem Rübenanbau werden Empfehlungen in bezug auf Gegenmaßnahmen ausgesprochen.

Im folgenden Abschnitt sollen die bisher dabei angewendeten Verfahren kurz erläutert und ihre Möglichkeiten und Grenzen aufgezeigt werden.

III.3 KONVENTIONELLE VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DES AUFTRETENS UND DER POPULATIONSDICHTE DES RÜBENZYSTENNEMATODEN

Da *H. schachtii* ein bodenbewohnender Nematode ist und auch seine Dauerorgane der Vermehrung, die Zysten, im Boden verbleiben, ist es naheliegend, sein Vorhandensein durch die Untersuchung von Bodenproben zu bestimmen.

Das generelle Vorgehen dabei ist (1) das Sammeln einer repräsentativen Bodenstichprobe im Feld, (2) die Bestimmung der Nematodenanzahl in dieser Bodenprobe, woraus (3) Rückschlüsse auf die Nematodenpopulation im gesamten Bestand und deren Schadwirkung gezogen werden.

III.3.1 Die Probenahme im Feld

Zum Vorgehen bei der Entnahme von Bodenproben, die auf ihren Inhalt an Nematoden untersucht werden sollen, sind bestimmte Richtlinien vorgegeben, die eine Vereinheitlichung von Stichprobenumfang und Stichprobengröße bewirken sollen.

Gemäß den gegenwärtig gültigen Richtlinien sollen je Hektar Feldfläche mit einem Stechprober 200 Einstiche bis 30 cm Tiefe gezogen werden (früher: 50 Einstiche/ha (BEHRINGER 1974)). Von der dabei erhaltenen Bodenmenge werden nach gründlicher Durchmischung etwa 1 000 ml entnommen. Diese Mischprobe wird in vier gleichvolumige Proben aufgeteilt (BÖTGER 1977) und gelangen anschließend zur Untersuchung; die einzelnen Resultate werden gemittelt und aus dem erhaltenen Mittelwert die Populationsdichte des betreffenden Feldes abgeleitet.

(Während der letzten Zeit wurden diese Richtlinien von einzelnen Untersuchungsanstalten modifiziert; BEHRINGER (1977, unveröff.) verlangt $8 \times 50 = 400$ Einzelproben je ha, wobei 8 Proben von jeweils zusammengefaßten 50 Einstichen zur Untersuchung gelangen).

III.3.2 Untersuchung der Bodenproben

III.3.2.1 Das Fenwick-Verfahren

Durch die Bestimmung der Menge der in den Bodenproben enthaltenen Zysten von *H. schachtii* werden Rückschlüsse auf seine Populationsdichte gezogen. Für diese Untersuchungen wird nach der Methode von FENWICK (1940) der getrocknete und gesiebte Boden über ein System von Sieb- und Dekantiergefäßen durch fließendes Wasser von den Zysten getrennt, die anschließend unter einem schwach vergrößerten Binokularmikroskop bestimmt und ausgezählt werden.

Dieses Verfahren wird mit einigen Verbesserungen zur vollständigeren Ausbeute an Zysten (OOSTENBRINK 1954 und 1960) und rascheren Durch-

führung, etwa durch die Überführung der Zysten auf Filtrierpapierstreifen am Gefäßrand, von der Mehrzahl der Untersuchungsanstalten praktiziert. Die ermittelten Zystenzahlen dienen als Basis für Fruchtfolge- oder Bekämpfungsempfehlungen oder zur Vorhersage von Ertragsverlusten.

III.3.2.2 Das Biotest-Verfahren

Bei dieser von BEHRINGER (1967) entwickelten Methode wird der zu untersuchende Boden in aus vier dreieckigen Säulen mit durchsichtigen Wandungen zusammengesetzte längliche Kunststoffgefäße quadratischer Grundfläche gegeben und mit Raps besät. Nach etwa achtwöchiger Versorgung im Gewächshaus (wobei nur die Gefäßoberfläche dem Licht exponiert ist) haben die Rapspflanzen ein dichtes Wurzelwerk entwickelt, an denen sich während dieser Zeit Zysten gebildet haben, sofern die Bodenprobe Zysten mit lebendem Inhalt oder lebende Larven enthalten hat. Die Versuchsgefäße werden in ihre vier Einzelteile zerlegt. Die von außen an den Wurzeln sichtbaren Zysten werden gezählt, woraus wiederum Rückschlüsse auf Befallstärke etc. gezogen werden.

III.4 FEHLERQUELLEN DER KONVENTIONELLEN VERFAHREN

Aufgrund langjähriger Erfahrungen in Forschung und Praxis entstanden Zweifel an der Zuverlässigkeit und Aussagegenauigkeit der in III.3 beschriebenen Vorgehensweisen (NOLTE 1959, HOLLNAGEL 1964, KÖSTERS & STIEMERLING 1975). Es soll zunächst theoretisch untersucht werden, ob und inwieweit diese Bedenken gerechtfertigt sein können.

III.4.1 Fehlerquelle Bodenprobenahme

Die zu untersuchende Bodenprobe stellt eine Stichprobe aus der Gesamtheit der oberen Bodenschicht eines Feldes dar. Da diese Stichprobe repräsentativ für das gesamte jeweilige Feld sein muß, soll sie sich aus den geforderten 200 Einzelstichproben je ha zusammensetzen.

Die Probenahme erfolgt im allgemeinen von Hand, wobei zylindrische, hohle Metallbohrstöcke mit einem inneren Öffnungsdurchmesser von 1,5 cm verwendet werden (Anm.: zur Öffnungsweite der Bohrstöcke

konnten keine verbindlichen Richtlinien gefunden werden; als Durchschnittswert erscheinen 1,5 cm realistisch). Daraus ergibt sich je Einzelprobe ein Bodenvolumen von $\pi \times 0,75^2 \times 30 \text{ (cm}^3\text{)} = 53 \text{ cm}^3$. Die Gesamtprobe von einem Hektar hat also ein Volumen von $200 \times 53 = 10\,600 \text{ cm}^3$. Es ist offensichtlich, daß bereits die Homogenisierung dieser Menge mittels Durchmischen, das auf dem Feld stattfindet, Schwierigkeiten bereitet. Eine Gleichverteilung der Zysten und Larven kann dabei selbst bei kleineren Bodenmengen nicht vollständig erreicht werden (HIRLING 1970). Die anschließend entnommenen rund $1\,000 \text{ cm}^3$ können daher nur noch zufällig die Ausgangsmenge repräsentieren. Eine Unterteilung der Fläche eines Hektars in vier gleich große Teilflächen, deren jeweils 50 Einzelproben für sich gemischt werden, wovon wiederum etwa 100 cm^3 zur Untersuchung gelangen (BÖTGER 1977), schafft bei diesem Problem keine befriedigende Abhilfe.

Weiterhin ist zu bedenken, daß das Volumen der 30 cm mächtigen Bodenschicht eines Hektars $3 \times 10^9 \text{ cm}^3 = 3 \times 10^6 \text{ l}$ beträgt. Ob die dagegen um den Faktor 3×10^6 kleinere Stichprobe repräsentativ sein kann, muß bezweifelt werden. Ähnliche Überlegungen stellten auch NOLTE (1959) und HIRLING (1970) an, nachdem sie starke Schwankungen in den Untersuchungsergebnissen mehrerer aufeinanderfolgender Probenahmen von derselben Fläche festgestellt hatten.

Ein weiteres Problem liegt in der Art des Vorgehens bei der Probenahme. Die Richtlinien besagen, daß der Probenehmer die Fläche zickzackförmig abzuschreiten hat und dabei in bestimmten Abständen Einstiche durchführen soll.

Aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung der Nematoden im Feld besteht dabei die Gefahr, daß die vorhandene Population über- oder unterrepräsentiert wird. Die beiden folgenden Schemazeichnungen (Abb. 4) sollen dies verdeutlichen.

Von den zeitlichen Aspekten der Populationsdynamik der Rüben nematoden aus betrachtet spielt der Zeitpunkt der Probenahme eine wichtige Rolle. Nach den Richtlinien von BEHRINGER (1977, unveröff.) und denjenigen anderer Anstalten wird dem keine Bedeutung beigemessen. Dabei ist zu bedenken, daß im Falle der Probenahme während eines Rübenanbaujahres erhebliche Differenzen vorliegen,

je nachdem die Probenahme im zeitigen Frühjahr (vor Beginn der Befallsaktivitäten), im Sommer (nach der Reifung der Zysten der 1. Generation) oder im Herbst (Zysten der 1. und der 2. Generation) durchgeführt wird.

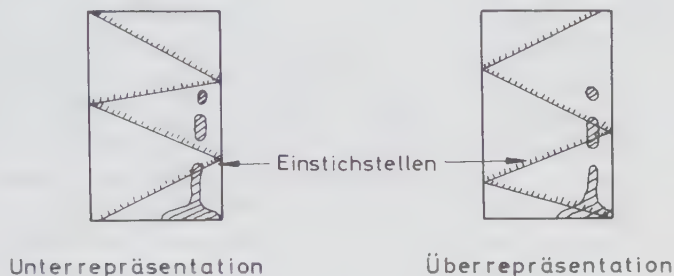


Abb. 4

Unter- bzw. Oberrepräsentation der Befallssituation. Schraffiert: Befallsherde

Auch ökonomische Aspekte müssen in diese Betrachtung einbezogen werden. Von einzelnen Untersuchungsanstalten werden DM 2.00 bis 2.50 je Probe (= 50 Einstiche) angesetzt; dies entspricht einem Aufwand von DM 8.- bis 10.- je ha bei 4 Untersuchungen bzw. DM 16.- bis 20.- je ha bei 8 Untersuchungen.

Schließlich soll noch der wissenschaftlich zwar nicht quantifizierbare (und daher meist ungenannte), aber für die Praxis sehr bedeutsame "Faktor Mensch" als Fehlerursache genannt werden.

III.4.2 Fehlerquelle Fenwick-Verfahren

Zunächst ist zu bedenken, daß vier Proben von einem Hektar Feldfläche aufgrund der inhomogenen Nematodenverteilung nicht ausreichen können, um die Befallssituation darzustellen. Nach Resultaten von STELTER & RAEUBER (1962) sowie HOLLNAGEL (1964) stellt auch HIRLING (1970) fest, daß eine Verbesserung der Genauigkeit nicht durch eine Erhöhung der Zahl der Einstichproben im Feld, sondern durch eine vermehrte Anzahl von Untersuchungen im Labor erreicht werden kann.

Da auch an anderen, im Rahmen von Fruchtfolgen angebauten Kulturpflanzen sowie an Unkräutern zystenbildende Nematoden der Gattung *Heterodera* parasitieren, muß beim Auszählen der ausgewaschenen

Zysten *H. schachtii* eindeutig von *H. rostochiensis* und *H. avenae* als den verbreitetsten anderen Arten differenziert werden. Weniger häufig sind i.a. auch die Zysten von *H. trifolii* und *H. galeopsidis* zu finden. Da aus Kostengründen die Auszählung möglichst rasch von-
statten gehen soll, wird die Unterscheidung nach der äußeren Form der Zysten vorgenommen. Dabei gelten Anhaltspunkte wie "zitronenförmig", "kugelförmig", etc. Wie Abb. 5 deutlich erkennen läßt, sind die dabei bestehenden Fehlermöglichkeiten sehr groß. Präzise Klassifizierungen der Zysten erfordern viel Zeit und Geduld und setzen gründliche Fachkenntnisse voraus. Bei Reihenuntersuchungen können sie höchstens in Ausnahmefällen durchgeführt werden.



Abb. 5

Zystenformen von *Heterodera schachtii* (aus THORNE 1961)

Die durch die Verhärtung der weiblichen Cuticula entstandene Zystenwand ist sehr beständig und zersetzt sich im Boden nur sehr langsam. Dadurch kann nach dem Schlüpfen und der Auswanderung aller Larven die leere Hülle noch über Jahre hinweg vollständig im Boden erhalten bleiben, wodurch sich schließlich Milliarden von - teils leeren - Zysten im Boden eines Hektars Feldfläche befinden können (THORNE 1961). Da durch eine äußerliche Betrachtung leere Zysten nicht als solche erkannt werden können, ist es notwendig, sie auf ihren Inhalt hin zu untersuchen. Dies geschieht durch die Öffnung der Zysten unter dem Mikroskop und eine grobe Schätzung ihrer Inhaltsmenge (1/1, 3/4, 1/2, 1/4, 0).

Damit ist jedoch immer noch nicht bekannt, ob und wie viele Eier und Larven in der Zyste lebensfähig sind. Unter Anwendung histochemischer Färbemethoden können tote Eier und Larven von lebenden unterschieden werden (DECKER 1969). Die noch weitergehende Bestimmung

der Anzahl lebender Eier und Larven schließlich ist derart zeit-
aufwendig daß sie nur bei wissenschaftlichen Untersuchungen ange-
wendet werden kann.

Ein weiterer Nachteil dieser Methode liegt darin, daß bei der Aus-
waschung der Bodenproben vielfach nicht alle Zysten erfaßt werden
können, da die Möglichkeit besteht, daß einzelne Zysten zusammen
mit den Bodenpartikeln verworfen werden. Das ist insbesondere bei
Böden mit hohem Humusanteil der Fall, da sich die nicht minerali-
sierten organischen Partikel nur schwer von den Zysten trennen las-
sen.

Auch hier müssen ökonomische Bedenken ins Feld geführt werden. Eine
Untersuchung ohne Bestimmung des Zysteninhalts wird mit DM 4.- bzw.
5.-, mit Inhaltsbestimmung auf DM 8.- bzw. 10.- veranschlagt. Da-
mit entstehen bei 4 Proben je ha Kosten zwischen DM 16.- und 40.-
wobei unter Berücksichtigung der geringen Aussagekraft der alleini-
gen Zystenzählung DM 40.- veranschlagt werden müssen. Da die DM 8.-
berechnende Untersuchungsanstalt prinzipiell von 8 Proben je ha
ausgeht, müssen hierbei DM 64.- angesetzt werden.

III.4.3 Fehlerquelle Biotest

Diese Methode hat gegenüber den Auswasch-Verfahren zunächst den
Vorteil, daß (1) nur *H. schachtii* erfaßt wird (sofern man das Problem
der Biotypen außer Acht lassen kann), (2) auch die frei im Boden be-
findlichen Larven einbezogen werden, (3) sehr geringe Populations-
dichten erfaßt werden können, und (4) geringere Kosten entstehen.

Ein schwerwiegender Nachteil darf jedoch nicht übersehen werden:
aus Gründen der Populationsdynamik dieser Tiere (s. Tab. 3) können
die Resultate der Auszählung neugebildeter Zysten keine genaue Aus-
sage zur tatsächlichen Populationsdichte im Feld erbringen. Es kann
daraus lediglich ersehen werden, ob in den untersuchten Bodenmengen
lebensfähige Tiere enthalten sind. Die Kosten dieses Verfahrens
belaufen sich bei 8 Paralleluntersuchungen je ha auf DM 24.- je ha.

III.4.4 Vergleichbarkeit und gemeinsame Nachteile beider Verfahren

Um Anhaltspunkte zu den Schlußfolgerungen und Empfehlungen, die
aus den Untersuchungsergebnissen der genannten Methoden resultieren
zu schaffen, wurden an Hand der Resultate von Parzellenversuchen

bestimmte Zystenmengen in Form von Schad- oder Befallsklassen zusammengestellt. Jeder Befallsklasse entsprechen bestimmte Hinweise auf Fruchtfolge- oder sonstige Maßnahmen, mit deren Hilfe eine zukünftige Schadwirkung verhindert oder vielmehr gemindert werden soll. Aus den dementsprechenden Einteilungen nach BÖTGER (1977) und BEHRINGER (1978) ist der Schluß zu ziehen, daß beide Verfahren direkt miteinander vergleichbar sein müssen (Tab. 4).

Tab. 4: Zusammenstellung der Befalls- bzw. Schadklassen und der entsprechenden Zystenzahlen für die Verfahren Fenwick (BÖTGER 1977) und Biotest (BEHRINGER 1978)

Befallsklasse	Fenwick Zysten je 100 ml	Biotest neugeb. Zysten	Ertragsminderung in % (n. Behr.)
O	0	0	0
I	1 - 5	1 - 5	5
II	6 - 10	6 - 10	15
III	11 - 20	11 - 20	20
IV	21 - 40	21 - 40	30
V	41	41 - 80	40
VI	n.n.	81	50

Läßt man einmal die in den letzten Abschnitten aufgezeigten Fehlermöglichkeiten außer Betracht und nimmt ein zufriedenstellendes Wirken der konventionellen Methodik an, so ist dennoch ein gravierender Nachteil festzustellen, nämlich, daß aus den dabei gewonnenen Ergebnissen keinerlei Anhaltspunkte über die Verteilung der Nematoden im Feld zu ersehen sind. Mit einer Aufteilung der Ackerfläche bei der Probenahme in eine bestimmte Anzahl (4, 8 oder mehr) definierter Teilflächen, wonach die Mischprobe jeder Teilfläche getrennt zu untersuchen ist, kann das Problem nicht vollständig gelöst werden; ganz abgesehen davon, daß dadurch in der Praxis erhebliche Aufwandssteigerungen bei der Probenahme (Vermessung, Beschriftung der Proben etc.) entstehen; zudem sind diese Arbeitsschritte mit neuen Fehlerquellen behaftet.

Der Rüben nematode kann seit kurzem auf chemischem Wege in Verbindung mit einem neuentwickelten Applikationsgerät mit Erfolg und - im Vergleich zu früher - auf rentable Weise bekämpft werden (SPRENGER

1977). Die Behandlungskosten sind dennoch so hoch, daß nematodenbedingte Schäden und Ertragsverluste erst ab einem bestimmten wirtschaftlichen Ausmaß eine ganzflächige Bodenentseuchung rechtfertigen. Wesentlich vorteilhafter noch wäre die gezielte Behandlung im Falle einzelner, begrenzter Befallszentren. Da die Behandlungszeitpunkte im Spätherbst vor dem folgenden Rübenanbau liegen, ist eine gezielte Applikation ohne die genaue Kenntnis der Befallsareale nicht möglich. Würde man sich auf die in Tab. 4 angeführten Befallsklassen/Ertragsverlustquoten verlassen, so könnte dies zu schweren betriebsökonomischen Belastungen für den einzelnen Landwirt und zu erheblichen Belastungen der Umwelt durch die hochtoxischen Entseuchungschemikalien führen. Anhand kleinflächiger Parzellenversuche dürfen eben wegen der ungleichmäßigen Befallsverteilung im Feld nur bedingt Rückschlüsse auf die Praxis gezogen werden.

Die in diesem Kapitel angeführten Tatsachen und Schlußfolgerungen weisen auf die Notwendigkeit eines zuverlässigen, kostengünstigen Verfahrens zur Erfassung und Inventarisierung von Nematodenschäden in Zuckerrübenbeständen hin. Im folgenden sollen Untersuchungen und Ergebnisse zu den Möglichkeiten der IRC-Luftbildfotografie in diesem Problembereich angeführt werden. Diese Studien wurden im Auftrag der Firmen Pfeifer & Langen, Köln und Süddeutsche Zucker AG, Mannheim und in Kooperation mit ihnen durchgeführt.

IV 'EIGENE UNTERSUCHUNGEN - MATERIAL UND METHODEN

IV.1 TESTGEBIETE

Für die Untersuchungen wurden die folgenden, intensiv landwirtschaftlich genutzten Gebiete mit hohem Anteil an Zuckerrübenanbau ausgewählt (Kartenausschnitte s.S. 73 - 75):

- (a) eine Region nordwestlich von Köln in der Umgebung von Ameln, am Rande der Kölner Bucht, charakterisiert durch fruchtbare Parabraunerdeböden und flache Topographie;
- (b) die Gegend südlich von Groß Gerau in der ebenen, alluvialen Schwemmsandzone des Rheins; hier herrschen leichte, lehmige Sandböden uneinheitlicher Strukturierung vor, die in der Nähe von Wasserläufen von schweren anmoorigen, durch Grundwasserschwankungen zur Vergleyung neigenden Böden abgewechselt werden, und
- (c) das Gebiet nördlich von Alzey, gekennzeichnet durch hügelige Topographie und mächtige Lößböden.

In der Region (c) wurden während des Jahres 1977 Untersuchungen durchgeführt, in den Gebieten (a) und (b) in den Jahren 1976 und 1977.

IV.2 ARBEITEN IM GELANDE

IV.2.1 Kartierungen

In den für die Befliegungen vorgesehenen Flächen wurden zur Grunddatenerhebung ein Teil (ca. 50 - 60 %) der Ackerflächen hinsichtlich der jeweiligen Feldfrucht in Katasterkarten 1 : 5 000 eingetragen. Ebenso wurde etwa die Hälfte der Rübenschläge bei der Feldbegehung auf Nematodenbefall und andere Schäden begutachtet und die Resultate auf der Karte vermerkt.

Anschließend an die Bildauswertung fanden eingehende Gelände- und Feldbegehungen zur Verifizierung der Interpretationsresultate statt.

IV.2.2 Testfelder

In jedem Testgebiet wurden einige Zuckerrübenfelder mit Nematodenschäden als Testfelder bestimmt. Dabei wurde darauf geachtet, daß sie etwa unter der geplanten Bildflugachse lagen, um auch dann ihre Abbildung zu gewährleisten, wenn die Flugstrecke nicht genau ge-

troffen wurde oder das Flugzeug leichte Rollbewegungen beschrieb. Ferner sollte der Zustand dieser Felder in bezug auf Wuchshöhe der Pflanzen, Reihenschluß, Verunkrautung und nicht von Nematoden verursachten Schädwirkungen repräsentativ für die anderen im Befliegungsgebiet liegenden Felder sein. Die Nematodenschäden wurden bei der Feldbegehung durch Ansprache der oberirdischen Symptome sowie durch die Untersuchung einiger Wurzelkörper auf Zysten bonitiert.

Im Gebiet Ameln wurden in beiden Versuchsjahren zehn, bei Groß Gerau im Jahre 1976 zehn und 1977 sechs und bei Alzey 1977 sechs Testfelder ausgesucht.

In jedem der Testfelder wurde ein deutliche Nematodenbefallssymptome aufweisender Bestandesteil ausgewählt und zu Bodenuntersuchungen herangezogen.

Außerdem wurde der Pflanzenbestand (Anzahl Pflanzen je ha) der Testfelder durch Auszählen ermittelt. Kenngrößen wie durchschnittliche Pflanzenhöhe, Bodenbeschaffenheit, sonstige Schädwirkungen und Verunkrautung (falls in Erfahrung zu bringen auch die Vorfrüchte) wurden auf eigens dafür vorbereiteten Formblättern zu den jeweiligen Befliegungszeitpunkten vermerkt.

IV.2.3 Bodenuntersuchungen

Zur Bodenprobenahme wurde in jedem Testfeld eine Parzelle mit rechteckigem Umriß (Breite = 5 m, Länge = $n \times 2$ m) jeweils so ausgemessen, daß sie sich über die Befallsstelle erstreckte und ihre Enden oder zumindest eines ihrer Enden im turgiden Bestandesteil lag. Ihre Position im Feld wurde durch Vermessungen exakt festgehalten. Anschließend wurden sie in Subparzellen der Größe 5 x 2 m unterteilt. Die Probenahme erfolgte mit Bohrstöcken bis zu einer Tiefe von 25 cm, wobei je Subparzelle mindestens 25 zufällig verteilte Einstiche vorzunehmen waren (Abb. 6).

Die erhaltene Bodenmenge (Volumen ca. 1,5 l) wurde gründlich durchmischt und für die einzelnen Untersuchungen aufgeteilt.

IV.2.3.1 Untersuchung auf Nematoden

Um einerseits Vergleiche zwischen der Genauigkeit der Luftbildinformation und der durch konventionelle Untersuchungen gewonnenen Resultate zu ermöglichen, und um andererseits einen Vergleich zwischen

den Verfahren Biotest und Fenwick durchzuführen, wurden Aliquots der jeweiligen Probemengen an zwei verschiedene staatliche Anstalten (I und II) verschickt. I untersuchte nach dem Biotest- und dem Fenwick-Verfahren, II nur nach dem Fenwick-Verfahren. Damit war zugleich die Möglichkeit gegeben, die Genauigkeit der Fenwick-Methode zu überprüfen.

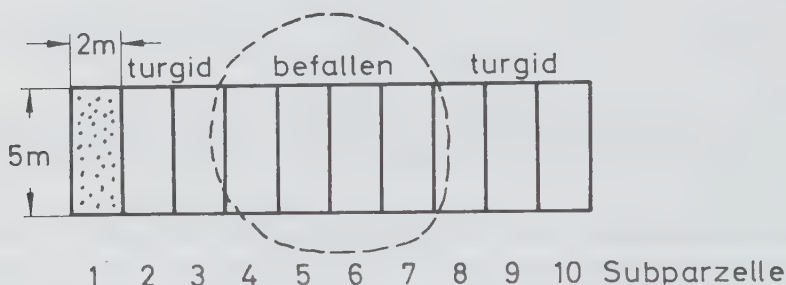


Abb. 6

Schema der Bodenprobenahme

IV.2.3.2 Untersuchung auf Bodenfeuchtigkeit und Nährstoffe

Um möglicherweise bestehende Zusammenhänge zwischen dem Turgorverlust der Blätter und dem Feuchtigkeits- und Nährstoffgehalt des Bodens zu finden, wurden diesbezüglich Analysen durchgeführt.

Die Bestimmung des Wassergehaltes erfolgte nach einem in der Bodenkunde allgemein üblichen Verfahren durch Ermittlung der Gewichts-differenzen der Proben im frischen Zustand und nach 16-stündiger Trocknung bei 105°C an jeweils 2 Parallelproben (HARTGE 1971).

Die auf pflanzenverfügbare Nährstoffe zu untersuchenden Bodenproben wurden ohne Zeitverzug zur Untersuchung bei der LUFA Bonn bzw. der Zuckerfabrik Offstein versandt. Folgende Analysenverfahren wurden angewendet:

- NO_3 : Extraktion des wasserlöslichen Nitrats mit CaCl_2 -Lösung; photometrische Messung bei 210 nm (nach VDLUFA)
- austauschbares P_2O_5 : Doppellaktatmethode nach Egner-Riehm (EGNER et al. 1960)
- austauschbares K_2O : Doppellaktatmethode nach Egner-Riehm (EGNER et al. 1960)
- austauschbares MgO : CaCl_2 -Methode (SCHACHTSCHABEL 1954)

IV.2.4 Beerntung der Versuchsparzellen

Zu Beginn der Erntezeit wurden die Rüben der einzelnen Subparzellen geerntet und das jeweilige Gesamtgewicht sowie das durchschnittliche Gewicht/Rübe bestimmt. Etwa 15 Rüben von jeder Subparzelle gelangten zur Analyse auf Zuckerausbeute und Nichtzuckerstoffe.

IV.3 LABORARBEITEN

IV.3.1 Reflexionsmessungen am Spektralphotometer

Zur Ermittlung exakter Daten fernerkundungswirksamer spektraler Reflexionsunterschiede zwischen Blättern nicht geschädigter Rüben einerseits und nicht-turgiden Blättern nematodenbefallener Pflanzen sowie vom Vergilbungsvirus geschädigter Blätter andererseits wurden Messungen am Spektralphotometer mit Reflexionsansatz durchgeführt.

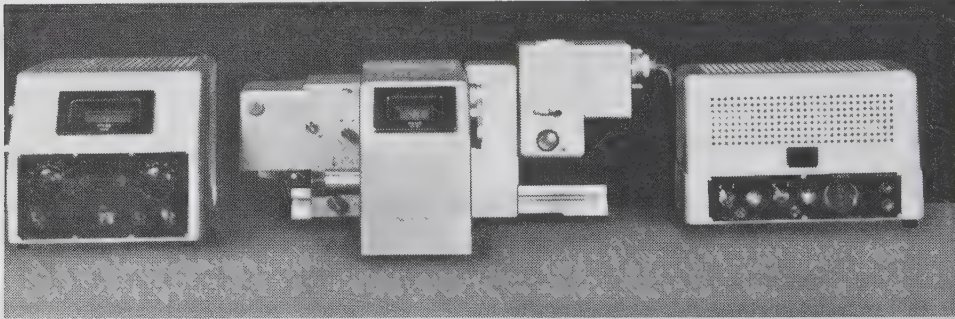
IV.3.1.1 Gerätebeschreibung

Der RA3 d/O⁰ Reflexionsansatz ist über eine optische Bank an das Zeiss Spektralphotometer PMQ II angeschlossen (Bild 1). Das Kernstück des Reflexionsansatzes ist eine Ulbrichtsche Kugel. Die von einer Glühlampe in das Kugellinnere abgegebene polychromatische Strahlung wird von der mit MgO berauchten Oberfläche der Kugelinnenwand reflektiert und aufgrund deren Lambert-Eigenschaften annähernd ideal diffus gestreut, so daß auf jedes beliebige Oberflächenelement näherungsweise derselbe Lichtstrom auftrifft. Eine kreisförmige Öffnung mit einem Durchmesser von 3 cm dient zum Anlegen des zu messenden Objektes. Der von dem Meßobjekt gerichtet reflektierte Strahlungsanteil wird über einen Kippspiegel auf die Eintrittsöffnung zum Monochromator gelenkt, wo sie durch ein NaCl-Prisma spektral zerlegt und auf den Meßempfänger errichtet wird (Abb. 7).

IV.3.1.2 Kalibrierung und Meßvorgang

Die Messungen wurden im Wellenlängenbereich zwischen 500 und 950 nm, der etwa der spektralen Empfindlichkeit des Kodak IRC-Films 2443 mit Wratten Gelbfilter Nr. 12 entspricht, durchgeführt.

Bild 1 Spektralphotometer Zeiss PMQ II mit Reflexionsansatz RA3 d/O⁰, betriebsbereiter Aufbau. (mit freundlicher Genehmigung der Fa. Carl Zeiss, Oberkochen)



Empfangs- und
Anzeigeeinheit

Monochromator
mit Wellen-
längeanzeige

Reflexions-
ansatz

220V/6V Trans-
formator

Vor Beginn jeder Meßserie wird das Gerät mittels einer mattpolierten, ebenen BaSO₄-Scheibe des Durchmessers 5 cm, die als sekundärer Reflexionsstandard dient, geeicht.

Die Abweichungen des Reflexionsvermögens dieses Referenzstandards von einem idealen Reflektor ($R \approx 100 \%$) bei einzelnen Wellenlängen werden vom Hersteller in Tabellenform mitgeliefert. Während des Eichvorganges wird durch Betätigen des Kippspiegels zunächst der vom BaSO₄-Standard reflektierte Anteil auf den Empfänger gerichtet. Über eine Abgleichsschaltung wird auf der Empfängereinheit der der jeweiligen Wellenlänge zugehörige, in der Referenztabelle verzeichnete Reflexionswert eingestellt. Anschließend läßt man den Kippspiegel in seine Ausgangsstellung zurückkehren, wodurch die von der Kugelwand reflektierte Strahlung zur Messung gelangt. Der nunmehr angezeigte Wert wird notiert und, da bei der Messung von Objekten die Kugelwand als Vergleichsbasis dient, beim späteren Meßvorgang als Referenzwert für die Objektreflexion eingestellt. Damit geben die erhaltenen Meßresultate näherungsweise absolute Reflexionswerte an. Ein Beispiel für einen Eichvorgang gibt Tab. 5.

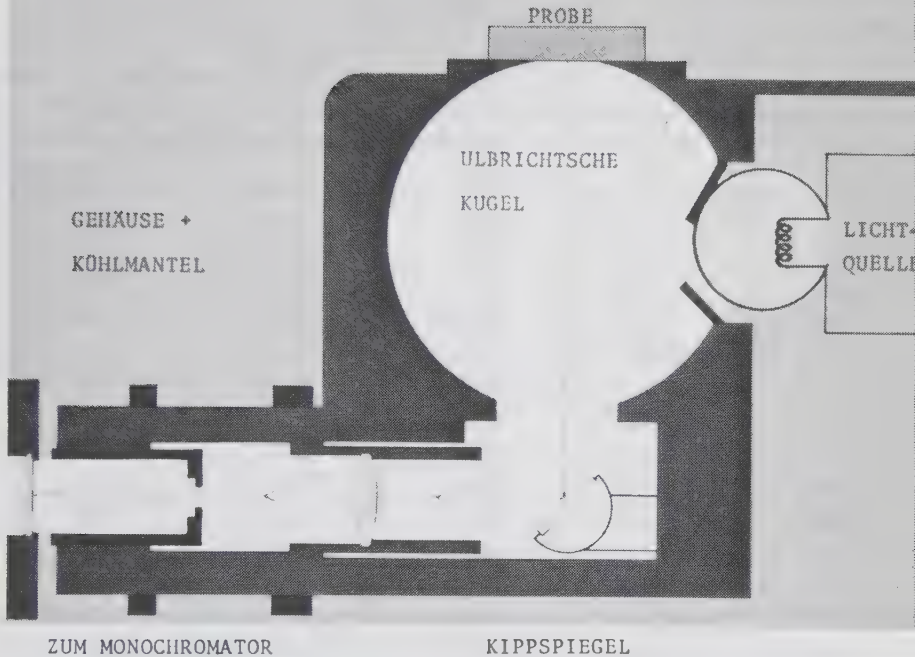


Abb. 7

Schematischer Längsschnitt durch den Remissionsansatz RA 3 d/0°
(mit freundlicher Genehmigung der Fa. Carl Zeiss, Oberkochen)

Um bei der Objektmessung eine Verfälschung der Meßdaten durch von der Raumbelichtung eingestrahktes, in die Kugel transmittiertes Licht zu vermeiden, wurde eine handelsübliche, an einem Ende geschlossene zylinderförmige Blechdose von 20 cm Höhe und einem Öffnungsdurchmesser von 7 cm auf der Innenseite vollständig mit mattschwarzem Lack betrichen und als Schwarzkörper über die Meßöffnung gestülpt. Ihre Eigenreflexion im Wellenlängenbereich 500 - 950 nm ist so gering (Tab. 5, Abb.15), daß aufgrund von Retroreflexion von den Schwarzkörperwandungen und Transmission durch das zu messende Blatt in die Kugel eintretende Strahlungsanteile, welche von dem in den Schwarzkörper transmittierten Anteil herrühren, keine meßbaren Verfälschungen der Reflexionsdaten

des Objekts verursachen können (SANWALD et al. 1977, ZITTERELL 1977).

Tab. 5: Beispiel für einen Kalibrierungsgang des RA3 d/0° Reflexionsansatzes mit und ohne Begrenzungsmaske

Wellenlänge (nm)	Werksangaben MgO/BaSO ₄	Eichwerte f. volle Meß- öffnung	Eichwerte f. Maske 1,5 cm	Schwarzkörper Reflexion (%)
500	87,7	96,1	90,6	0,6
520	87,9	96,3	90,3	0,6
550	87,6	96,3	89,8	0,6
580	86,7	96,4	89,8	0,6
600	86,0	96,4	89,7	0,6
620	85,4	96,5	89,4	0,6
640	84,4	96,0	89,0	0,6
660	84,4	96,9	88,8	0,8
680	84,6	96,9	88,6	0,8
700	84,4	96,8	88,5	0,8
725	84,0	96,5	88,3	0,9
750	83,5	96,8	88,1	0,9
775	82,8	96,6	88,1	1,0
800	82,1	96,4	88,3	1,1
825	81,4	96,3	88,3	1,1
850	80,6	96,3	88,5	1,1
875	80,0	96,5	88,5	1,2
900	79,3	96,4	88,6	1,2
950	78,3	96,9	88,6	1,3

Um eine Planlage der zu messenden Blätter bzw. Blattstücke zu gewährleisten, wurde eine metallene, 1 mm starke, kreisförmige Ringscheibe des Gesamtdurchmessers 5 cm und des lichten Durchmessers 3 cm angefertigt und ebenfalls mattschwarz lackiert. Zur Messung wird zunächst das Blatt und darüber die Ringscheibe auf die Kugelöffnung gelegt, so daß die Ringöffnung exakt mit der Meßöffnung übereinstimmt. Durch das Gewicht des Metalls wird das flach ausgerichtete Blatt plan gehalten.

Die ausdifferenzierten Blätter der Zuckerrübe besitzen eine vielfach größere Fläche als die Meßöffnung. Es war daher nicht möglich,

die spektrale Reflexion ganzer Blätter meßtechnisch zu erfassen. Um dennoch aussagekräftige Resultate erhalten zu können, und um gleichzeitig festzustellen, ob innerhalb der Fläche desselben Blattes Reflexionsunterschiede vorliegen, wurden von jedem zu messenden Blatt drei Stücke ausgeschnitten und untersucht. Die Entnahmestellen der Blattstücke wurden wie aus Abb. 8 ersichtlich festgelegt.

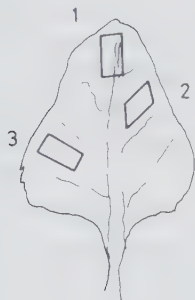


Abb. 8

Lage der zur Messung entnommenen
Blattstücke

Um ein Austrocknen der Blattstücke und damit einhergehende unkontrollierbare spektrale Reflexionsänderungen während des Meßvorganges zu vermeiden, wurde der Kugelansatz durch die vorhandene Wassermantel-Umlaufkühlung gekühlt.

Bei der Messung der Reflexionseigenschaften von Blattstielen (s.u.) liegt ebenfalls ein Problem in der Größe der Meßöffnung. Da die Blattstiele der Zuckerrübenpflanze weniger als 3 cm breit sind und in ihren Dimensionen variieren, sind bei voller Meßöffnung keine exakten Messungen möglich, da ein undefinierbarer Anteil der auf die Meßfläche auftreffenden Strahlung am Objekt vorbeifließt und in den Schwarzkörper eintritt. Die Kalibrierung der Meßanordnung ergibt für solche Verhältnisse keine gültigen Bezugswerte.

Es wurde daher eine weitere Metallscheibe der gleichen Spezifikationen wie oben beschrieben angefertigt, aus welcher zentral anstelle einer Scheibe ein Stück von 3 cm Länge und 1,5 cm Breite herausgefräst wurde. Auf die Meßöffnung aufgelegt, dient sie als Schlitzmaske zur Begrenzung des austretenden Lichtes, und Blattstiele können flächendeckend angelegt werden. Zur Kalibrierung dieser veränderten Meßanordnung wird im Anschluß an einen normalen

Eichvorgang die Maske an die Meßöffnung angelegt; der Referenzstandard wird darüber angebracht. Aufgrund der dadurch erfolgten Verkleinerung der reflektierenden Gesamtfläche wird bei jeder gegebenen Wellenlänge im Meßbereich ein im Vergleich zum ursprünglichen Eichwert kleinerer Referenzwert angezeigt werden, der bei der nachfolgenden Objektmessung als neuer Eichwert einzustellen ist (Tab. 5).

Bei der Messung der spektralen Reflexionseigenschaften von Bodenproben aus der Ackerkrume wird wie beschrieben (ohne Maske) verfahren, allerdings wird der Reflexionsansatz um 180° geschwenkt, um die Probe von unten anlegen zu können und ein Verschmutzen der Kugel zu vermeiden.

IV.3.1.3 Entnahme des Blattmaterials

In der Literatur sind fast nirgends Hinweise darüber zu finden, wieviele Parallelen die einzelnen spektralphotometrischen Meßvorgänge an Blättern beinhalteten. Aufgrund eigener Erfahrungen bei der Messung spektraler Transmissionen (SANWALD & KOCH 1975) ist selbst bei biologischer Homogenität des Versuchsmaterials (bzgl. Pflanzenalter, Blattposition, Versorgungs- und Gesundheitszustand) mit Schwankungen der optischen Eigenschaften zu rechnen. THOMAS et al. (1967) fanden bei der Messung von jeweils 5 Parallelproben (Baumwollblätter) eine Standardabweichung von 2 % im Wellenlängenbereich 500 - 2 500 nm. Möglicherweise basieren die zahlreichen späteren Arbeiten in diesem Gebiet auf dieser Aussage, und dementsprechend wurde auch bei den hier beschriebenen Untersuchungen verfahren.

Aus einzelnen Testfeldern wurden von jeweils 5 verschiedenen nicht geschädigten, nematoden- und virusgeschädigten Pflanzen turgide bzw. nicht turgide oder virusvergilbte Blätter an der Blattstielbasis entnommen und sofort in Kunststoffbeuteln luftdicht verpackt. Bei der Entnahme der Blätter wurde darauf geachtet, daß voll ausdifferenzierte, grüne, für die Gesamtheit der zur Reflexion des Bestandes beitragenden Blätter repräsentative Exemplare entnommen wurden; junge Herzblätter kamen ebensowenig in Betracht wie abster-

bende ältere Blätter. Die Kunststoffbeutel mit dem Blattmaterial wurden in eisgekühlten, wärmeisolierten Behältern zum Untersuchungs-ort gebracht und bis zum Versuchsbeginn - spätestens 24 h nach der Entnahme von der Pflanze - bei 4°C aufbewahrt. Auf diese Weise können Feuchtigkeitsverluste auf ein Minimum gesenkt werden (GAUSMAN et al. 1973).

IV.3.2 Bestimmung der Blattflächenindices und des Faktors R_{∞}

Der Blattflächenindex (abgek. BFI)¹⁾ ist eine für die Reflexionseigenschaften von Pflanzenbeständen wichtige Größe. Er ist definiert als das Verhältnis zwischen der Summe der einseitigen Blattflächen und der Einheit der Bodenoberfläche, von einer zu dieser parallelen Ebene am höchsten Punkt der Bestandeswuchshöhe gemessen (WIEGAND et al. 1969).

Im ultravioletten und sichtbaren Spektralbereich ist der BFI von untergeordneter Bedeutung, da hier die Absorption durch Blattpigmente und die Reflexion an Cuticula und Epidermis überwiegen; auch ist hier die Reflexion der Bodenoberfläche relativ gering (s.a. Abb. 16). Im Nahen IR ist bei der hohen Transmission und Reflexion dagegen die Retroflexion des transmittierten Anteils von einem eventuell darunterliegenden Blatt durch das erstere hindurch zu berücksichtigen. Bis zum Erreichen eines Grenzwertes wird diese um so höher sein, je mehr Blätter unterhalb dieses ersten Blattes liegen. Das als R_{∞} bezeichnete Maximum hängt von der art-, alters- und zustandsspezifischen Reflexionscharakteristik der Pflanze ab. Es kann durch Messungen im Spektralphotometer bestimmt werden, indem so lange von einem Meßvorgang zum nächsten ein zusätzliches Blatt über das auf der Meßfläche befindliche gebracht wird, bis keine weitere Zunahme der Reflexionsintensität mehr festgestellt werden kann. Dabei ist zu beachten, daß homogenes Blattmaterial untersucht wird, da die aus der Kugel auf das zuunterst liegende Blatt abgestrahlte Wärme im Verlauf von mehr als einem Meßdurchgang Welkeerscheinungen und unkontrollierbare Reflexionsänderungen verursachen kann. Das unterste Blatt muß daher immer durch ein frisches ersetzt werden.

¹⁾ der in der angelsächsischen Literatur gebräuchliche entsprechende Ausdruck ist Leaf Area Index, abgek. LAI. Für den deutschen Sprachbereich wird die Abkürzung BFI hiermit vorgeschlagen und verwendet.

Mit der Ermittlung des BFI in den Zuckerrübenbeständen der Testgebiete sollte die Frage beantwortet werden, ob im Freiland von der Pflanzendichte her gesehen konstante Reflexionsverhältnisse vorliegen und inwieweit diese sich dem gemessenen R_{∞} nähern.

Zudem können bei bekanntem BFI einzelner Bestände Schwankungen der Reflexionsintensität und dadurch verursachte Abbildungsdifferenzen erklärt und Fehlinterpretationen vermieden werden.

Da im Versuchszeitraum 1976 aufgrund der großen Trockenheit außer in einigen intensiv beregneten Flächen des Gebietes Groß Gerau zu den Befliegungszeitpunkten kein Reihenschluß vorlag, wurde auf die Bestimmung des BFI verzichtet, denn bei Bodensicht zwischen den Pflanzreihen ist diese Größe irreführend, sofern sie sich nicht ausdrücklich auf die von den Pflanzen bedeckte Teilfläche des Bodens bezieht.

Im Sommer 1977 dagegen war in allen drei Testgebieten ein vollständiger Reihenschluß vorhanden.

Zu den jeweiligen Befliegungszeitpunkten wurden die folgenden Größen ermittelt:

- die durchschnittliche Anzahl der Blätter je Pflanze (bestimmt durch das Auszählen und Mitteln der Blätter von jeweils 50 Pflanzen eines Testgebietes);
- die durchschnittliche Blattfläche (auf gravimetrischem Wege an jeweils 30 Blättern eines Testgebietes gemessen), und
- die durchschnittliche Anzahl der Pflanze je ha (bestimmt durch das Auszählen des Bestandes der Testfelder).

Damit läßt sich der durchschnittliche BFI errechnen.

IV.3.3 Anatomische und mikroskopische Untersuchungen

Um Zusammenhänge zwischen möglichen Reflexionsunterschieden der Blätter nematodengeschädigter und nicht geschädigter Zuckerrübenpflanzen und ihrem anatomischen Zellaufbau zu erforschen, wurden Stücke des Blattgewebes von jeweils fünf verschiedenen Pflanzen präpariert und mikroskopisch untersucht.

Bei der Präparation wurde nach der Methode von BRANSCHIED (1977) folgendermaßen verfahren:

1. Fixierung in 4 % Formalin für 3 Tage
2. In fließendem Wasser wässern für 4 Stunden

3. Entwässerung in einer aufsteigenden Äthanolreihe
(70 %, 80 %, 90 % und 3 x 95 %, jeweils 1 Stunde)
4. Vorbereiten in EFL 67 (Fa. Serva, Heidelberg); in Lösung EFL 67 A (I) 1 Stunde, in Lösung EFL 67 A (II) über Nacht
5. Einbettung in EFL 67 (42 Teile Lösung A + 1 Teil Lösung B)
6. Schneiden am Hartschnittmikrotom
7. Färbung: 10 min. in Hämalaun nach Mayer, anschließend 15 min. fließend wässern
8. Eindecken in Karion F (Fa. Merck).

Dieses Verfahren, von BRANSCHIED ursprünglich zur Präparation tierischer Gewebeteile entwickelt, eignet sich besonders gut zur Herstellung sehr dünner mikroskopischer Schnitte; selbst das empfindliche Blattgewebe mit den zarten Zellwänden des Schwammparenchyms kann ohne große Gefahr der Artefaktbildung bis zu 3 μ m dünn geschnitten werden.

IV. 4 BEFLIEGUNGEN

Mit der Durchführung der Bildflüge wurde eine Firma beauftragt. Als Aufnahmegerät kam eine Zeiss Reihenmeßkammer mit Objektiven der Brennweiten 153 mm (Weitwinkel) und 305 mm (Tele) und einem Negativformat von 23 x 23 cm zu Einsatz. Als Filmmaterial wurde Kodak 2443 IRC-Film, in Kombination mit einem Gelbfilter verwendet.

Zeitpunkte und technische Daten der einzelnen Befliegungen sind in Tab. 6 zusammengefaßt.

In den Kartenausschnitten des Maßstabs 1 : 50 000 auf den folgenden Seiten sind die Versuchsgebiete wiedergegeben. Die Lagen der Einzelbilder der jeweiligen Befliegungen wurden maßstabsgerecht und paßpunktgenau eingemessen und eingezeichnet.

IV.5 AUSWERTUNG DES BILDMATERIALS

Die Bildqualität in bezug auf Farbbalance, Dunstfreiheit und Schärfe ist bei sämtlichen Befliegungen des Jahres 1976 einwandfrei. Dagegen weisen die Aufnahmen des Jahres 1977 sämtlich einen starken Blau- stich auf, der vermutlich auf Fehler während des Entwicklungsvor- ganges zurückzuführen ist; zudem wirken sich im Gebiet Ameln leichte, im Gebiet Groß Gerau mittlere Dunsteinwirkungen negativ auf die Bildqualität aus.

Tab. 6: Zeitpunkte und technische Daten der Bildflüge in den Jahren 1976 und 1977

Testgebiet	Datum und Uhrzeit	Objektivbrennweite (mm)	Flughöhe (m ü. Gr.)	Bildmaßstab	Überdeckung (%)	Flugrichtung
Ameln	24. 6. 1976	305	1 500 u.	1 : 5 000	80 längs	S - N
	11.32 - 11.58		3 050	1 : 10 000		N - S
	22. 8. 1976	305	1 500 u.	1 : 5 000	80 längs	S - N
	12.17 - 12.43		3 050	1 : 10 000		N - S
Groß Gerau	5. 8. 1977	305	3 050	1 : 10 000	30 längs	S - N
	15.00 - 15.01					
	27. 6. 1976	305	1 500	1 : 5 000	60 längs	N - S
	11.16 - 11.22					
Alzey	2. 9. 1977	153	1 125	1 : 7 500	30 längs	N - S
	13.27 - 13.33					
	24. 9. 1977	153	1 500	1 : 10 000	30 längs u. 30 quer	S - N N - S
	13.52 - 14.01					

IV.5.1 Visuelle Bildinterpretation

Die einzelnen in Klarsichtfolie verpackten Aufnahmen wurden zur visuellen Auswertung auf einer von unten gleichmäßig mit Leuchtstoffröhren ausgeleuchteten Milchglasscheibe mit bloßem Auge, unter Zuhilfenahme einer 8-fach vergrößernden Lupe sowie - im Falle stereoskopischer Bildüberlappung - durch ein Linsenstereoskop mit bis zu 8-facher Vergrößerungsmöglichkeit betrachtet.

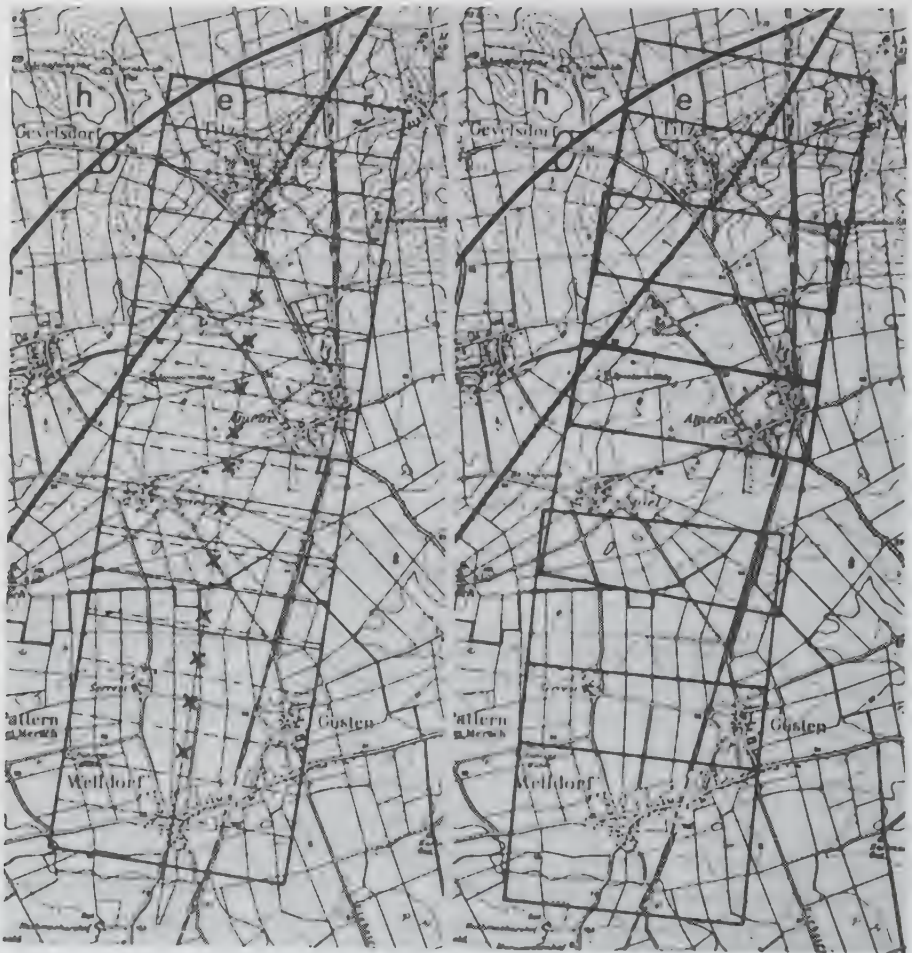
Zunächst wurde durch Vergleiche zwischen Bildinhalt und Kartierung versucht, Zuckerrübenfelder von anderen Kulturen zu unterscheiden und dazu einen dichotomen Klassifizierungsschlüssel aufzustellen. Dabei kamen insbesondere die Parameter der Farbe - Farbton, Farbhelligkeit und Farbsättigung -, die Oberflächentextur und die Wuchshöhe als Differenzierungsfaktoren in Betracht.

Anschließend wurden die von der Kartierung nicht erfaßten Bildflächen auf ihre Inhalte interpretiert und die Resultate mit den Gegebenheiten im Gelände verglichen, um die Anwendbarkeit und Genauigkeit des erarbeiteten Klassifizierungsschemas zu überprüfen.

In der gleichen Weise wurde bezüglich der Ansprache von Nematodenschäden verfahren; als Interpretationshilfen wurden hierbei neben Farbe und Form auch agrarbiologische Kenngrößen, insbesondere die der Schadwirkung und des Ausbreitungsmodus der Nematoden im Bestand eingesetzt.

Während des zweiten Versuchsjahres wurde zunächst, ohne die Kartierungen einzubeziehen, das Bildmaterial auf Rübenschläge und Nematodenschäden interpretiert und die dabei erzielten Resultate in Kopien der Katasterkarten eingetragen. Anschließend wurden diese Aufzeichnungen, welche auch die Lokalisationen von Nematodenschäden einschlossen, mit den Kartierungen und durch intensive Feldbegehungen mit den Gegebenheiten im Gelände verglichen.

Die Interpretationsergebnisse beider Versuchsjahre wurden in Schwarzweiß-Kontaktkopien der jeweils kleinstmaßstäbigen Aufnahmen (Ameln u. Alzey 1 : 10 000, Groß Gerau 1 : 7 500) eingetragen. Daraus kann (1) die Häufigkeit des Zuckerrübenanbaues auf der erfaßten landwirtschaftlichen Nutzfläche und (2) die Verbreitung des Auftretens von Nematodenschäden in den beflogenen Gebieten ersehen werden.



1976; m_b = 1 : 10.000

1977; m_b = 1 : 10.000



Abb. 9

Befliegungsstrecke und Bildlagen im Gebiet Ameln



1976; $m_b = 1 : 5\,000$

1977; $m_b = 1 : 7\,500$

Abb. 10

Befliegungsstrecken und Bildlage im Gebiet Groß Gerau





1977; $m_b = 1 : 10.000$

Abb. 11

Befliegungsstrecken und Bildlagen im Gebiet Alzey

IV.5.2 Gerätegestützte Bildauswertung

Um die visuell ermittelten Aussagen zu quantifizieren, wurden die optischen Dichten interessierender Bildinhalte auf meßtechnischem Wege bestimmt. Zugleich sollte mit diesen Messungen festgestellt werden, ob mit ihrer Hilfe eine Verbesserung in bezug auf die Auswertgenauigkeit erreicht werden kann und ob eine Automatisierung des Interpretationsvorganges auf digitaler Basis möglich ist.

IV.5.2.1 Messungen am MacBeth-Densitometer

Auf eine ausführliche Gerätebeschreibung kann hier unter Hinweis auf die Arbeiten von TZSCHUPKE (1974), ROHDE (1977) und CAGIRICI (1878) verzichtet werden. Eine knappe Erläuterung des Kalibrierungsvorganges erscheint dennoch notwendig:

Unter Beachtung der von der Meßapertur abhängigen Verstärkereinstellung auf der Geräterückseite werden nach einer 20-minütigen Aufheizperiode der Verstärkerröhren Null- und Hundertpunkt fixiert. Der auf der Meßskala angezeigte Abstand zwischen diesen beiden Größen entspricht dem maximalen Empfindlichkeitsbereich des Gerätes von 3,4 D ($D = \text{optische Dichte} = \log \frac{T}{T_0}$, wobei $T = \text{Lichtstrom vor Passieren eines Mediums/Lichtstrom nach Passieren des Mediums}$). Dies bedeutet, daß der 100-Punkt dem Anzeigewert 3,4 D auf der Skala entspricht. Zur Eichung des Zwischenbereiches wurde ein kalibrierter Stufengraukeil verwendet. Ein solches Vorgehen erschien notwendig, damit mögliche, gerätebedingte Schwankungen der Empfänger- und Verstärkerleistung bei der oft mehrere Stunden andauernden Dichtemessung an den als Diapositive vorliegenden Luftbilddaufnahmen durch die zeitweilige, etwa stündliche Messung einiger Graukeilstufen und Vergleich mit den Kalibrierungsdaten vermieden werden können. Dabei muß stets derselbe, unverschmutzte und unbeschädigte Graukeil verwendet werden.

Die Eichwerte für den bei den im folgenden beschriebenen Messungen benutzten Stufengraukeil der Fa. Agfa-Gevaert wurden durch mehrfache Vergleichsmessungen ermittelt und tabellarisch festgehalten (Tab. 7).

Mittels der Messungen an diesem Gerät sollten die optischen Dichtewerte und Farbanteile von unbewachsenen Bodenoberflächen, Kartoffelfeldern und nematodengeschädigten sowie nicht geschädigten Flächen in Zuckerrübenfeldern festgestellt werden; u.a. auch unter der Ziel-

setzung, die Bildortabhängigkeit dieser Parameter und damit die Differenzierungsmöglichkeiten in verschiedenen Bildbereichen zu erfassen.

Tab. 7: Eichwerte für den Stufengraukeil Agfa-Gevaert

Stufe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dichte	0.05	0.20	0.35	0.50	0.65	0.80	0.95	1.09	1.24
ΔD		0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.15

Stufe	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Dichte	1.38	1.54	1.68	1.82	1.97	2.13	2.28	2.45	2.60	2.72
ΔD	0.14	0.16	0.14	0.14	0.15	0.16	0.15	0.17	0.15	0.12

Die Meßapertur betrug 1 mm beim Bildmaßstab 1 : 10 000 und 1 : 7 500 bzw. 2 mm bei $m_b = 1 : 5\,000$. Dies bedeutet, daß die bei jeder Einzelmessung erfaßte Fläche in situ bei $m_b = 1 : 10\,000$ und 1 : 5 000 78,5 m² umfaßt; bei $m_b = 1 : 7\,500$ sind es 44,1 m². Bei einer durchschnittlichen Pflanzenanzahl von ca. 65 000 je ha entspricht dies der integrierten Reflexion von 471 bzw. 287 Zuckerrübenpflanzen, die bei jeder Messung registriert wird.

Da einzelne Feldflächen in mehreren aufeinanderfolgenden Aufnahmen zur Messung herangezogen werden und die Meßpunkte dabei stets dieselben sein sollten, wurden die Umrisse dieser Felder ebenso wie die durchnummerierten jeweils 10 Meßpunkte auf einem Stück transparenten Zeichenpapiere festgehalten. Von jeder Einzelmessung zur nächsten wurde diese Zeichnung paßgenau auf die Abbildung gelegt und so verschoben, daß der jeweilige Meßpunkt exakt mit der Öffnung des abgesenkten Meßkopfes korrespondiert.

IV.5.2.2 Messungen am Mikrodensitometer

Bezüglich der Beschreibung des Aufbaus von Joyce Loeb1 MK III CS Mikrodensitometer soll hier auf die Arbeiten von AKCA (1970), TZSCHUPKE (1974) und SCHOEDLER (1973) verwiesen werden. Einige Funktionsprinzipien bedürfen jedoch einer näheren Erläuterung.

Das von einer Halogenlampe der Leistung 100 W ausgestrahlte Licht

wird über ein Prisma in zwei Strahlengänge (Meßstrahl und Referenzstrahl) aufgespalten, die jeweils über optische Kondensoren näherungsweise als parallele Strahlenbündel ausgerichtet werden. Der Meßstrahl durchdringt die zu messende Probe und wird durch ein optisches Vergrößerungssystem auf eine Photoelektronenvervielfacherröhre geleitet. Der Referenzstrahl ist ebenfalls permanent auf die Verstärkerröhre gerichtet. Um die Messung der Differenzen zwischen beiden Signalen zu ermöglichen, läßt eine mit konstanter Geschwindigkeit rotierende Chopperscheibe abwechselnd die beiden Strahlenbündel auf die Verstärkerröhre auftreffen. Ein auswechselbarer, in einer Schienenführung beweglich gelagerter Graukeil kontinuierlich linearer Dichteänderung wird nun entsprechend der Stärke des Differenzsignals durch einen Synchronmotor soweit verschoben, bis seine Dichte derjenigen der Probe entspricht. Letztere ist auf einem zweidimensional fahrbaren Tisch befestigt. Bei analogem Meßverfahren wird der Tischvorschub in x-Richtung über Hebel variabler Übersetzungsverhältnisse auf eine Schreibplatte übertragen; die gemessenen Dichteänderungen werden durch eine mit dem Graukeil mitlaufende Schreibfeder als sinusähnliche Kurve kontinuierlich aufgezeichnet. Um ein rasterähnliches Abtasten der Probe zu ermöglichen, kann nach jedem Lauf die Tischplatte durch einen Schrittmotor mit Vorschubanzeige in y-Richtung verschoben werden; außerdem sollte zur besseren Vergleichbarkeit bei der Aufzeichnung von mehr als 2 Meßlinien das Schreibpapier gewechselt werden. Die vom Schreiber aufgezeichnete Kurve spiegelt die Dichteänderungen des abgetasteten Bildausschnittes wieder.

Eine Kalibrierung der aufgezeichneten optischen Dichtewerte wurde durch das Abtasten des in IV.5.2 beschriebenen geeichten Stufengraukeils bei exakt derselben Geräteeinstellung wie beim Abtasten der jeweiligen Bilder erreicht. Durch Überlagern der treppenförmigen Graukeil-Kurve mit der Meßkurve können deren einzelne Dichten gemessen werden (s.a. CARNEIRO 1978).

Analoge Messungen wurden zur Überprüfung der Unterscheidungsmöglichkeiten zwischen Kartoffel- und Rübenfeldern sowie zur Quantifizierung der Differenzen zwischen turgiden und nicht turgiden Bestandteilen durchgeführt.

Bei vergleichenden Messungen ist es von Bedeutung, daß

(a) die Meßfläche dieselbe und so groß ist, daß sie mehrere Pflanzen erfaßt, und

(b) die Abtastrichtung gleich verläuft, um keine irreführenden Texturparameter zu erhalten; dies ist am einfachsten zu erreichen indem sie übereinstimmend mit der Richtung der Pflanzenreihen oder senkrecht dazu ausgerichtet wird.

Zum direkten Vergleich der Bildaussage mit den Boden- und Pflanzenuntersuchungen wurden die jeweiligen Testparzellen in die Bilder eingemessen und mikrodensitometrisch abgetastet; der erhaltene Dichteverlauf wurde mit den graphischen Darstellungen der Untersuchungsergebnisse auf Nematodenbesatz und Pflanzenertrag korreliert.

Um maximale Trennungen zwischen den zu unterscheidenden Bildinhalten zu erreichen, wurden Farbfilter in den Meßstrahlengang gebracht. Gleichzeitig können daraus Rückschlüsse auf denjenigen Spektralbereich der Pflanzenreflexion gezogen werden, der charakteristische Differenzierungsmerkmale beinhaltet.

Um die gemessenen Dichtewerte auf eine einfachere Weise als durch das zeitaufwendige Ausmessen über eine Graukeileichung zahlenmäßig zu erfassen, wurde zur digitalen Arbeitsweise übergegangen. Das Mikrodensitometer ist dazu mit einem kleinen Computer gekoppelt. Die digitalisierten Dichtewerte werden auf eine Kassetteneinheit mit zwei Magnetbandkassetten übertragen; das Peripheriegerät zur Eingabe von Programmen und Befehlen sowie zur Datenausgabe ist eine Schreibmaschine. Die Firma Joyce Loebel liefert zu dieser Geräteverbindung ein Programmsystem der Bezeichnung WIZARD, das speziell für die digitale Erfassung der Dichten von Bildvorlagen entwickelt wurde. Dieses Programmsystem enthält jedoch Mängel, die seine Anwendung unmöglich machten. Die - teilweise unlogischen - Fehler in dem übergeordneten Steuerprogramm konnten nach mühevoller Arbeit eliminiert werden, und zum gegebenen Aufgabenbereich wurden neue Programme mit der Bezeichnung WIPS (Wizard Image Processing System) geschrieben (LANGE 1976/77 unveröff.). Die WIPS-Programmversionen, welche zu den Bildanalysen dieser Arbeit verwendet werden sollten, dienten (1) zur Definition des abzufahrenden Rasters und zur Aufnahme der vom Mikrodensitometer gemessenen Daten, (2) zur Verrechnung dieser Daten (Mittelwert, Varianz, Standardabweichung), und (3) zum Ausdrucken sämtlicher

oder der verrechneten Daten durch die Schreibmaschine; letztere können auch als Histogramm ausgedruckt werden (s.a. KEßLER 1977).

Das Abtastfeld ist bei digitaler Steuerung quadratisch mit einer Seitenlänge von $n \times 5 \mu\text{m}$, wobei $n > 0$ und ganzzahlig ist. Die Schrittweite, definiert als der Abstand zwischen den Einzelmessungen in einer Zeile, ist mindestens so groß wie die Seitenlänge des Abtastfeldes, und weiterhin ebenfalls ein ganzzahlig positives Vielfaches von 5. Die Zeilenlänge ist so zu wählen, daß eine geradzahlige Anzahl von Messungen möglich ist. Nach dem Abtasten einer Zeile wird der Tisch in y-Richtung verschoben und fährt zugleich um eine Zeilenlänge zurück, um anschließend die neue Zeile abzutasten. Der Zeilenabstand ist ebenso wie der Abtastabstand n mal die Größe der Seitenlänge des Abtastfeldes (wobei n ganzzahlig und > 1 ist), also mindestens $5 \mu\text{m}$. Sowohl Abtast- als auch Zeilenabstand können je nach der Art der Aufgabenstellung gewählt werden.

Allerdings sind auch die bei dieser Arbeitsweise erhaltenen Dichtewerte, deren Umfang aus technischen Gründen bei der Programmearbeitung um den Faktor 2^2 von 1 024 auf 256 verringert wurde, nur relativ, wodurch ebenfalls eine Eichung mittels eines kalibrierten Graukeils notwendig ist. Dies kann durch folgende Überlegung, deren Ausgangspunkt in der Arbeit von GAUSMAN et al. (1974) gefunden wurde, umgangen werden:

Dichteumfang und Dichteänderung/cm der auswechselbaren, kontinuierlichen Graukeile sind bekannt. Der Faktor Dichteänderung/cm soll als Graukeilfaktor bezeichnet werden. Die Stellung dieses beweglichen Graukeils im Gerät entspricht der optischen Dichte des jeweiligen Meßpunktes und wird als Zahlenwert zwischen 0 und 255 ausgegeben, d.h. der begrenzte, definierte Dichteumfang des Graukeils wird in 256 Stufen unterteilt, gleichgültig, welcher Graukeil sich gerade im Gerät befindet. Wird nun vor der Bilddichtemessung unter Verwendung desselben Gerätegraukeils ein kalibrierter Stufengraukeil gemessen, so werden dessen einzelne Dichtestufen, soweit sie im Bereich des Gerätegraukeiles liegen, ebenfalls digital registriert. Da die geringste Dichte im Dichteumfang des internen Graukeils i.a. nicht mit der geringsten Dichte des Stufengraukeils übereinstimmt, sondern größer ist, der digitale Wert 0 also nicht der geringsten Dichte entspricht, sind die digitalen Objekt-

meßwerte zu groß. Durch die Subtraktion der digitalen Stufenkeildichte, welche der geringsten Dichte des Gerätekeils entspricht, von den Objektmeßwerten können diese korrigiert werden. Die Umrechnung in optische Dichtewerte erfolgt durch die Multiplikation mit dem Graukeilfaktor. Mit der Addition des Dichtewertes, welcher der geringsten Dichte des kalibrierten Stufenkeils entspricht und die als niedrigst meßbarer Wert die Basislinie für die Objektmessungen darstellt, wird die Ermittlung der absoluten optischen Dichte vervollständigt.

Dieser Gedankengang kann folgendermaßen zusammengestellt werden:

$$D = (\text{Objektmeßwert} - \text{geringste Gerätekeildichte}) \times \text{Graukeilfaktor} + \text{geringste Stufenkeildichte}.$$

Beispiel: (der verwendete Gerätekeil sei B-139 mit dem Faktor
0,011 Dichteeinheiten/cm)
 $D = (128 - 34) \times 0,011 + 0,04$
 $D = 1,07$

Für diesen Rechenablauf wurde ein Programm zur automatischen Korrektur der digitalen Dichtewerte in absolute optische Dichten geschrieben (HULTZSCH 1978, unveröff.), das allerdings aufgrund hardwarebedingter Probleme nicht angewendet werden konnte.

Wegen kontinuierlicher technischer Störungen und Mängel der EDV-Einheit konnten im Versuchszeitraum keine befriedigenden digitalen Meßresultate erreicht werden. Es werden daher bei der Darstellung der Ergebnisse ausschließlich die analogen Daten vorgestellt werden.

IV.5.2.3 Arbeiten am elektronischen Bildanalysator

Beschreibung und Funktionsweise des VP-8 Image Analyzers ist bei HAYDN et al. (1975) sowie TRAUTH (1977) nachzulesen. Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen wurde das Gerät in erster Linie zur Dichteentrennung und Farbcodierung einzelner Zuckerrübenfelder oder Nematodenschadstellen verwendet, wodurch eine Verdeutlichung von mit bloßem Auge nur schwer differenzierbaren Dichteunterschieden erreicht werden konnte. Auf diese Weise konnten auch Dichteunterschiede in der Abbildung einzelner Befallsstellen dargestellt werden, wodurch eine relative Schadstufenklassifizierung ermöglicht wird. Die auf dem Farbmonitor dargestellten Resultate wurden auf

Farbumkehrfilm der Farbtemperatur 5 500⁰K fotografiert und dienen u.a. aufgrund ihrer Anschaulichkeit zur Stützung und Verdeutlichung der durch die übrigen Untersuchungen erhaltenen Aussagen.

V EIGENE UNTERSUCHUNGEN - ERGEBNISSE UND DISKUSSION

V.1 BODENUNTERSUCHUNGEN

V.1.1 Untersuchungen auf Bodenfeuchtigkeit

In den untersuchten Parzellen der Testfelder wurde jeweils eine Bodenprobe aus dem Befallszentrum, d.h. aus derjenigen Subparzelle, welche die schwersten Schadsymptome aufwies, und eine Probe aus dem turgiden Bestandesteil auf den Wassergehalt untersucht (s. IV 2.3 und IV.2.3.2).

Die Resultate sind in den Tabellen 8 und 9 zusammengefaßt. Dabei geben die Relativwerte die prozentuale Differenz zwischen dem Wassergehalt des jeweiligen Befallszentrums und dem entsprechenden turgiden Bestandesteil an.

Aus den errechneten prozentualen Unterschieden des Wassergehaltes im Boden der Befallszentren gegenüber jenen im Boden des turgiden Bestandesteils läßt sich kein eindeutiger Trend herleiten. Vielmehr ergibt eine globale Zusammenfassung dieser Werte aus den Tabellen 8 und 9, daß in 25 von 52 = 48,1 % der Fälle in den Befallszentren eine geringere und in 27 von 52 = 51,9 % der Fälle eine höhere Bodenfeuchtigkeit vorliegt als in turgiden Bestandesteilen. Die ermittelten Zahlenwerte sind dabei im Grunde ohne Bedeutung. Durch die Schätzung des pflanzenverfügbaren Wasseranteils in den Böden der Untersuchungsgebiete aus den bei HARTGE (1971) angegebenen Wasserspannungskurven wird ersichtlich, daß der permanente Welkepunkt lediglich im trockenen Sommer 1976 im Befallszentrum von Testfeld III vorlag (s. Tab. 8). Es konnten somit keine symptomatischen Korrelationen zwischen nematodenbedingten Welkerscheinungen und Wassermangel gefunden werden. Dadurch sind bei der Luftbildauswertung (s.u.) Fehlinterpretationen der Art, daß Nematodenschäden als Wassermangelercheinungen angesprochen werden und umgekehrt, weitgehend auszuschließen.

Die unterschiedlichen Feuchtigkeitsrelationen können aufgrund von einzelnen Beobachtungen damit erklärt werden, daß bei relativ geringerem Wassergehalt des Befallszentrums der Boden durch die ge-

Tab. 8: Wassergehalte der Testfelder im Gebiet Groß Gerau 1976

Römische Zahlen: Testfeld-Nr.; 1 = Befallszentrum, 2 = turgider Bestand.
Probenahme bis 25 cm Bodentiefe

Testfeld	Groß Gerau				Ameln (17. 6. 76)	
	1. Termin (21.- 25. 6. 76) Gewichts-%	Differenz (%)	2. Termin (28. 9.- 2. 10. 76) Gewichts-%	Differenz %	Gewichts-%	Differenz (%)
I 1	6,51	+ 41,1	7,55	+ 8,6	10,01	+ 12,1
I 2	4,60		6,95		8,93	
II 1	10,30	- 4,5	11,43	- 11,3	17,70	- 8,4
II 2	10,79		12,89		19,33	
III 1	1,00	- 17,4	6,54	- 34,0	8,15	- 11,2
III 2	1,21		9,91		9,17	
IV 1	7,02	- 1,3	17,15	+ 3,0	5,75	+ 77,5
IV 2	7,11		16,65		3,24	
V 1	16,79	+ 20,4	19,18	- 2,2	7,55	+ 28,4
V 2	13,94		19,61		5,88	
VI 1	17,48	- 15,0	23,94	+ 26,9	8,84	- 1,6
VI 2	20,56		18,87		8,98	
VII 1	13,99	- 4,3	18,70	+ 2,7	9,70	- 19,4
VII 2	14,62		18,20		12,03	
VIII 1	14,15	+ 38,7	18,37	+ 0,1	5,28	- 17,2
VIII 2	10,20		18,35		6,38	
IX 1	3,28	- 69,8	20,01	+ 34,7	9,90	+ 3,5
IX 2	8,15		14,86		9,57	
X 1	18,11	+ 53,5	21,00	+ 2,7	6,35	- 10,3
X 2	11,80		20,45		7,18	

Tab. 9: Wassergehalte der Testfelder 1977. Römische Zahlen: Testfeld-Nr.; 1 = Befallszentrum,
2 = turgider Bestand. Probenahme bis 25 cm Bodentiefe.

Testfeld	Ameln (8. 8. 77)		Groß Gerau-Alzey (4. 8. 77)		2. Termin (2. 9. 77)	
	Gewichts-%	Differenz (%)	1. Termin Gewichts-%	Differenz (%)	Gewichts-%	Differenz (%)
I 1	10,4	+ 31,6	10,19	+ 0,1	13,97	+ 3,1
I 2	7,9		11,18		13,55	
II 1	14,6	+ 22,7	13,44	- 13,4	13,39	- 23,8
II 2	11,9		15,52		17,57	
III 1	9,3	+ 4,9				
III 2	8,9					
IV 1	9,9	- 3,0	14,78	+ 3,1	19,52	- 14,3
IV 2	10,2		14,34		22,79	
V 1	9,1	+ 1,1	7,65	+ 60,7	12,5	- 8,9
V 2	9,0		4,76		13,72	
VI 1	10,3	+ 19,8	9,04	- 24,3	13,17	- 13,0
VI 2	8,6		11,94		15,13	
VII 1	9,5	+ 10,5	12,24	+ 31,8	12,35	+ 6,9
VII 2	8,6		9,29		11,55	
VIII 1	8,3	- 14,4	10,59	+ 9,4	11,38	+ 2,5
VIII 2	9,7		9,68		11,10	
IX 1	11,6	+ 16,0	10,58	- 17,5	14,92	+ 16,0
IX 2	10,0		12,82		12,86	
X 1	11,4	+ 23,9	11,41	- 7,5	14,32	- 2,8
X 2	9,3		12,34		14,74	
XI 1			11,12	+ 12,0	13,69	+ 7,7
XI 2			9,93		12,71	
XII 1			11,58	- 1,0	9,66	- 2,5
XII 2			11,70		9,91	

schädigten, klein gebliebenen Pflanzen nicht vollständig bedeckt wird, sich bei direkter Sonneneinstrahlung stark aufheizt und damit trotz eingeschränkter Transpiration der befallenen Pflanzen mehr Wasser verdunstet als der Boden des turgiden Bestandesteiles, welcher durch das Blattwerk abgeschattet wird und durch die Wassernachführung aus tieferen Bodenschichten in die bei der Probenahme erfaßten Schicht einen geringeren transpirationsbedingten Wasserverlust aufweist. Im umgekehrten Fall sind die schlaffenden Blätter der Pflanzen des Befallszentrums weitgehend normal entwickelt und decken die Bodenfläche ab; zudem ist ihre Transpiration stark eingeschränkt. Dadurch ist in diesen Fällen der Wassergehalt des Bodens im turgiden Bestand relativ geringer.

V.1.2 Untersuchungen auf Nährstoffe und Säuregrad

V.1.2.1 Stickstoff

Untersuchungen des Stickstoffgehaltes der Testfeldparzellen wurden im Jahre 1976 im Gebiet Groß Gerau und 1977 im Gebiet Ameln durchgeführt (s.IV.2.3 und IV.2.3.2). Wie bei den Feuchtigkeitsbestimmungen wurde auch hier jeweils eine Probe aus dem Befallszentrum und eine aus dem turgiden Bestand analysiert. Die Analysenergebnisse (in mg/100 g Boden) sind in Tabelle 10 in der gleichen Weise wie die Wassergehalte in Tabelle 8 und 9 zusammengestellt.

In 22 von 28, also 78,6 % der Untersuchungen liegen in den Befallszentren höhere Gehalte an pflanzenverfügbarem Stickstoff vor als in den turgiden Arealen.

Durch die verringerte Nährstoffaufnahmefähigkeit der befallenen Pflanzen ist ein solches Ergebnis schon theoretisch zu erwarten. Andererseits ist bei solchen Untersuchungen auch stets die selbst kleinflächig sehr inhomogene Nährstoffverteilung im Boden zu berücksichtigen. Dennoch ist die generelle Aussage, daß der Gehalt an pflanzenverfügbarem Stickstoff in Flächenteilen mit starkem Nematodenbefall höher liegt als in voll produktiven Arealen, aus dem Trend der Resultate abzuleiten.

N-Mangelsymptome konnten an den befallenen Pflanzen in keinem Fall beobachtet werden. Ein Einfluß auf das Schadbild liegt also nicht vor.

Tab. 10: Nitrat-Stickstoffgehalte der Testfelder in den Gebieten Groß Gerau (1976) und Ameln (1977). Römische Zahlen: Testfeld-Nr.; 1 = Befallszentrum; 2 = turgider Bestand. Probenahme bis 25 cm Bodentiefe.

Testfeld	Groß Gerau			Ameln	
	1. Termin (21.- 25. 6, 76) NO ₃ mg/100 g Boden	Differenz (%)	2. Termin (28. 9.- 2.10.76) NO ₃ mg/100 g Boden	NO ₃ mg/100 g Boden	Differenz (%)
I 1	4,22	+ 1 073	7,06	100,11	- 11,7
I 2	0,36		10,91	113,32	
II 1	1,61	+ 151,7	15,11	160,69	+ 43,0
II 2	0,64		15,11	112,34	
III 1	8,68	+ 97,3	12,83	41,17	- 13,6
III 2	4,40		3,08	47,64	
IV 1	1,51	- 29,9	16,04	38,96	+ 74,6
IV 2	2,21		2,56	22,32	
V 1	80,60	+ 62,5	24,61	114,35	+ 31,5
V 2	49,60		22,94	86,93	
VI 1	30,38	+ 36,1	30,84	156,46	+ 249,3
VI 2	22,32		14,80	39,68	
VII 1	8,06	+ 103,1	15,32	26,2	- 47,3
VII 2	3,97		9,01	49,7	
VIII 1	5,58	+ 136,5	28,88	98,42	+ 104,2
VIII 2	2,36		12,85	48,22	
IX 1	2,36		7,06	106,57	+ 283,5
IX 2	n.n.		3,85	27,79	
X 1	n.n.		15,11	152,52	+ 17,6
X 2	1,24		17,28	129,66	

V.1.2.2 Phosphat, Kalium, Magnesium und Säuregrad

Untersuchungen auf den Gehalt der Bodenproben an austauschbarem P_2O_5 , K_2O und MgO sowie bezüglich des pH-Wertes wurden während beider Versuchsjahre im Gebiet Ameln durchgeführt (s. IV.2.3 und IV.2.3.2). Tabelle 11 gibt die Resultate des Jahres 1977 wieder; im Jahre 1976 wurden die Proben sämtlicher Subparzellen analysiert (s. Anhang II). Zwei Beispiel dazu sind in den Abbildungen 12 und 13 aufgeführt.

Obgleich auch hier zu erwarten war, daß die stark befallenen Pflanzen einen relativ geringeren Anteil an den genannten Nährstoffen aufnehmen, konnte dies anhand der Ergebnisse nicht bestätigt werden. Lediglich im Falle des P_2O_5 deutet sich ein ähnlicher Trend wie bei Nitrat-Stickstoff an.

Auch hier konnten keine Nährstoffmangelsymptome an den Pflanzen in den Testparzellen beobachtet werden.

Bei den Resultaten der pH-Messung wurde neben den pH-Werten lediglich vermerkt, ob im Boden der Befallszentren relativ höhere oder niedrigere Werte als im Boden der turgiden Bestandesteile vorliegen.

Die schwache Tendenz zum weniger sauren Medium in den nematodengeschädigten Bestandesteilen ist wohl kaum mit der in III.1.4.2 angeführten Bevorzugung neutraler bis leicht basischer Böden durch die Tiere zu erklären; die gemessenen Differenzen sind vielmehr auf kleinräumlich bedingte, bei derartigen Untersuchungen im normalen Schwankungsbereich liegende Differenzen zurückzuführen.

Für die gegebene Aufgabenstellung sind die Ergebnisse der Bodenanalysen insofern von Bedeutung, als die Schlußfolgerung gezogen werden kann, daß das Auftreten von Nematodenschadsymptomen bei den in den Testgebieten üblichen Dünge- und Bewirtschaftungsmaßnahmen nicht von dem Nährstoffgehalt oder dem Säuregrad des Bodens abhängt. Eine diesbezügliche Fehlklassifizierung bei der Schadinterpretation aus Luftaufnahmen ist demzufolge auszuschließen.

Tab. 11: Gehalte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen; Säuregrad (Originaldaten).
Testfelder im Gebiet Ameln 1977. Römische Zahlen: Testfeld-Nr.; 1 = Befallszentrum,
2 = turgider Bestand. Probenahme bis 25 cm Bodentiefe.

Testfeld	P ₂ O ₅ mg/100 g Bo.	relativ	K ₂ O mg/100 g Bo.	relativ	MgO mg/100 g Bo.	relativ	pH (CaCl ₂)	relativ
I 1	24	+ 60	22	+ 22,2	6	+ 20	7,0	+
I 2	15		18		5		6,6	
II 1	40	+ 33,3	17	+ 6,3	7	+ 75	6,5	+
II 2	30		16		4		5,9	
III 1	24	- 11,1	27	+ 107,7	6	- 25	6,4	-
III 2	27		13		8		6,6	
IV 1	24	+ 9,1	29	- 3,3	7	+ 75	6,7	+
IV 2	22		30		4		6,1	
V 1	39	- 23,6	52	- 21,2	4	+ 0	6,3	-
V 2	51		66		4		6,9	
VI 1	29	+ 81,3	56	+ 86,7	5	+ 25	6,4	+
VI 2	16		30		4		6,1	
VII 1	21	+ 22,2	16	- 15,8	3	- 25	6,4	+
VII 2	27		19		4		6,2	
VIII 1	46	+ 21,0	33	+ 57,1	3	- 25	5,9	+
VIII 2	38		21		4		5,8	
IX 1	37	+ 0	54	- 5,3	3	- 50	6,6	-
IX 2	37		57		6		6,7	
X 1	60	+ 0	62	- 38,0	5	- 16,7	6,5	+
X 2	60		100		6		6,4	

V.1.3 Untersuchungen auf Nematoden

Um direkte Zusammenhänge zwischen Luftbildinhalt und den Gegebenheiten in situ zu erforschen und zugleich die Aussagekraft von Bodenuntersuchungen auf Nematodenpopulationen zu überprüfen, wurden zu den Befliegungsterminen Bodenproben gezogen und an die zuständigen Untersuchungsstellen versandt (zur Methodik und Erläuterung s. IV.2.3). Sofern vor dem Versand eine Zwischenlagerung der Proben erforderlich war, erfolgte diese bei ca. 4°C im Dunkeln.

In den Tabellen 12 und 13 und den Abbildungen 12-14 sowie 25 und 27 sind einige Beispiele für die Resultate angeführt; die übrigen Ergebnisse finden sich in tabellarischer Form in Anhang I.

Da die untersuchten und verglichenen Proben gründlich gemischten Mischproben entstammen, kann unter Einbeziehung der Überlegungen zur Genauigkeit (III.4) sowie der in III.4.4 gegebenen Klassifizierungstabelle zwar nicht erwartet werden, daß die Resultate der einzelnen Subparzellen von den Zahlenwerten her genau übereinstimmen, wohl aber, daß sie nur etwa innerhalb des jeweiligen Klassenlimits streuen. Diese Erwartungen wurden nicht immer bestätigt. Die einzelnen Resultate differieren teilweise sehr stark. Aus den Abbildungen 12-14, 25 und 27 werden Differenzen im Parzellenverlauf besonders klar ersichtlich, wobei der Vergleich zwischen Fenwick- und Biotestverfahren häufig Gegenläufigkeiten erkennen läßt. Aus den Überlegungen zur Populationsdynamik ist vorhersehbar, daß bei geringen Ausgangspopulationen im Biotestgefäß ein relativ starker Populationszuwachs erfolgt.

Nachdem gemäß der "Vorläufigen Richtlinien für die Prüfung von Mitteln gegen zystenbildende Wurzel nematoden" der Biologischen Bundesanstalt in Braunschweig von 1975, d.h. für wissenschaftliche Untersuchungen, mindestens 20 Einzelstichproben aus Parzellen von 20 m² Größe verlangt werden, liegt die bei den hier beschriebenen Untersuchungen angewandte Stichprobendichte von mindestens 25 je 10 m² um den Faktor 2,5 höher. Damit kann die Probenahme nicht als Hauptursache für die beobachteten Schwankungen verantwortlich gemacht werden. Da bei Nematodeninventarisierungen unter Feldbedingungen die Probenahmedichte um den Faktor 125 geringer ist, wobei aus dem Durchschnitt der Mischprobenauswertung Rückschlüsse auf potentielle Ertragsverluste und Empfehlungen in bezug auf Gegenmaßnahmen

Tab. 12: Vergleich der Resultate von Nematodenuntersuchungen aus Bodenproben
(Fenwick: Zysten mit Inhalt je 100 ml Boden; Biotest: Durchschn. Anz. neugeb.
Zysten je Biotestgefäß)

Sub- parz.	III GG 1976 (22.6.)		I Ameln 1976 (22. 8.)		VII Ameln 1976 (22. 8.)	
	Fenwick	Biotest	Fenwick I	Fenwick II	Fenwick I	Fenwick II
1	27	9	18	78	22	116
2	48	19	38	82	30	61
3	103	6	60	86	18	69
4	64	21	23	52	3	8
5	72	27	32	56	0	8
6	80	71	34	74	4	15
7	82	59	18	83	6	9
8	99	59	19	88	3	7
9	40	112	42	83	1	4
10	15	45	18	62	2	5
11	57	33	26	44		
12	84	71				
13	69	59				
14	51	41				
16	23	36				
17	5	4				
18	12	20				
19	19	49				
20	55	20				
21	41	43				
22	61	28				
23	65	20				
24	39	33				
25	50	26				

Tab. 13: Vergleich der Resultate von Nematodenuntersuchungen aus Bodenproben
(Fenwick: Zysten mit Inhalt je 100 ml Boden; Biotest: Durchschn. Anz. neugeb.
Zysten je Biotestgefäß)

Subparzelle	I Ameln 1977 (8.8.)		X Alzey 1977 (2. 9.)	
	Fenwick I	Fenwick II	Fenwick	Biotest
1	42	41	10	34
2	52	34	1	59
3	60	25	3	62
4	47	38	5	56
5	39	79	3	39
6	25	51	6	29
7	51	75	3	54
8	63	64	9	78
9	53	81	2	56
10	52	71		
11	122	65		
12	119	102		
13	65	88		
14	60	94		
15	47	54		
16	19	61		
17	37	56		

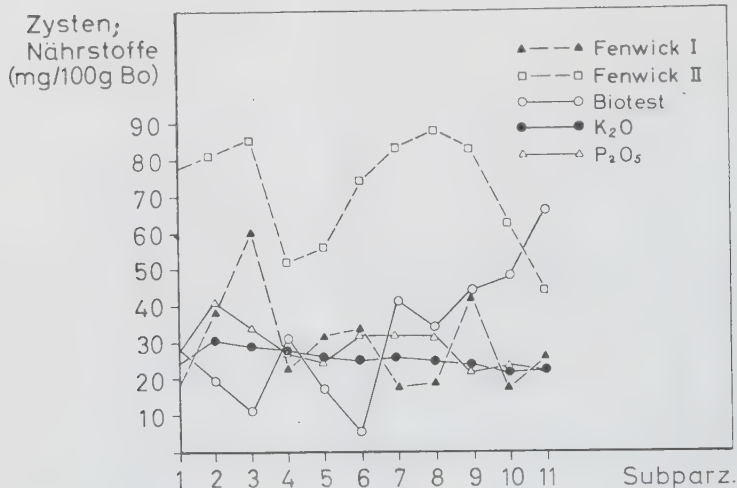


Abb. 12

Anzahl der Nematodenzysten und Nährstoffgehalte (I Ameln 1976)

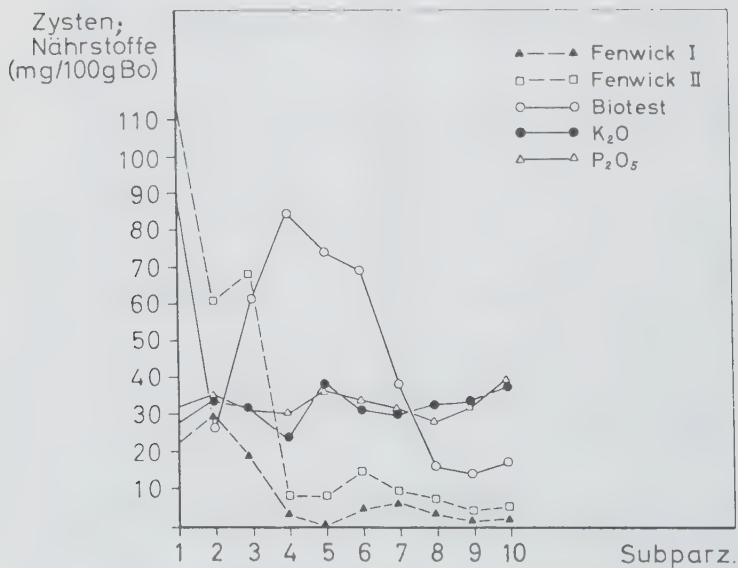


Abb. 13

Anzahl der Nematodenzysten und Nährstoffgehalte (VII Ameln 1976)

abgeleitet werden, liegt die Schlußfolgerung nahe, daß die dabei erhaltenen Resultate fallweise Unsicherheiten beinhalten können. Auch ist die Verteilung der Tiere im Bestand daraus nicht abzuleiten.

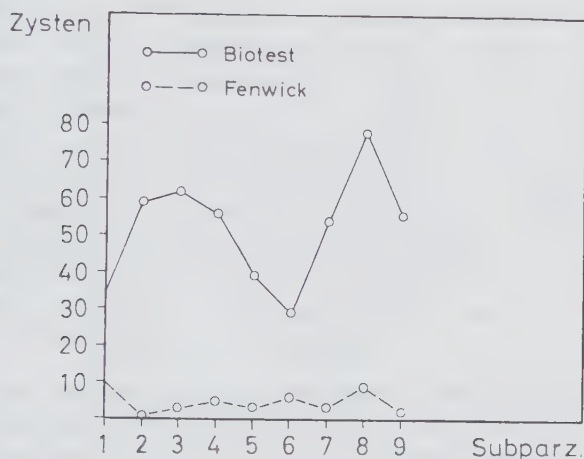


Abb. 14

Resultate der Bodenuntersuchungen auf Nematoden (X Alzey 1977)

Fenwick: Anzahl Zysten mit Inhalt je 100 ml Boden;

Biotest: Durchschnittliche Anzahl neugebildeter Zysten je Biotestgefäß

Nach WEISCHER (1978, pers. Mitt.) sind die aus den Untersuchungsergebnissen abgeleiteten kritischen Anmerkungen zur Aussagesicherheit der konventionellen Methoden zur Nematodenerfassung aufgrund der Probenahmezeitpunkte und -orte nur bedingt von genereller Gültigkeit. Erfolgt die Probenahme nämlich im Wirtspflanzenbestand während der Vegetationsperiode, so haben die schlüpfbereiten Larven die Zysten bereits verlassen und vermehren sich an den Pflanzenwurzeln. Die von der 1. und 2. Generation neu gebildeten Zysten befinden sich noch an den Rübenwurzeln und gelangen erst im Herbst bei der Ernte größtenteils in den Boden. Zweifellos kann der entstandene Populationszuwachs und damit die erhöhte Populationsdichte erst aus im Spätherbst oder im folgenden Frühjahr gezogenen Bodenproben ermittelt werden. Es sei an dieser Stelle auf die Richtlinien der zuständigen

behördlichen Untersuchungsanstalten verwiesen, welche keinerlei Anhaltspunkte in bezug auf Probenahmetermin und Bebauungsart der Probenahmeflächen beinhalten.

Andererseits aber ist die vor dem Wirtspflanzenanbau im Boden vorliegende Population lediglich um die Anzahl der aus den Zysten ausgewanderten Larven verringert. Die in den während der Vegetationsperiode entnommenen Proben enthaltenen Zystenmengen bleiben dagegen bei verringertem Inhalt gleich. Bei der Auszählung nach Fenwick wurde unterschieden zwischen Zysten mit Inhalt und leeren Zysten, wobei nur die ersteren berücksichtigt wurden. Die Fehlermöglichkeit, die hierbei dadurch gegeben ist, daß einige Zysten durch die Auswanderung geleert worden sind, ist aufgrund des sequentiellen Auswanderungsmodus (S. 46) jedoch als gering zu veranschlagen. Im übrigen ist die Schlußfolgerung zulässig, daß die jeweils ermittelten Zystenanzahlen der Subparzellen einer Parzelle mit dem relativen Ertragsverlauf negativ korreliert sein müßten.

Die Populationsbestimmung nach dem Biotest-Verfahren könnte dadurch beeinträchtigt werden, daß die schlüpfbereiten Larven bereits im Frühjahr die Zysten verlassen und die Wurzeln der Wirtspflanze aufgesucht haben, so daß sich in den Biotestgefäßen unterrepräsentativ wenige Zysten an den Rapswurzeln bilden. Allerdings konnten keine Befunde in der Literatur entdeckt werden, welche besagen, daß eine erneute Schlüpfstimulierung vor einer längeren Winterruhe nicht möglich sei. Es ist zu bedenken, daß die Bodenproben vor der Untersuchung im Dunkeln und bei ca. + 4°C aufbewahrt werden. Während der Biotest-Versuchsdauer werden dann wieder optimale Bedingungen und Schlüpfreize erzeugt. Tatsächlich weisen die Resultate der durchgeführten Untersuchungen darauf hin, daß eine Unterrepräsentation nicht vorliegt. Vielmehr geben - wie es auch aus theoretischen Überlegungen (s. III.1.5) zu folgern ist - bei niedrigen Auszählergebnissen nach Fenwick die Biotestresultate bedeutend höhere Populationsdichten an.

Um die Zusammenhänge zwischen den aus den Bodenuntersuchungen bestimmten Nematodenpopulationen und den Ertragswerten zu erfassen, wurde ein Vergleich ihrer Ergebnisse mit den ermittelten Rübenenerträgen vorgenommen. Jede der untersuchten Parzellen schloß eine Subparzelle mit turgiden, voll produktiven Pflanzen und normalen

Ertragsleistungen sowie eine Subparzelle mit nicht turgiden Pflanzen niedrigerer Ertragsleistung und visuell bonitiertem starkem Nematodenbefall an den Wurzeln ein. Da aufgrund der bereits beschriebenen Untersuchungen (s. V.1.1 u. V.1.2) andere Schadfaktoren wie Wasser- und Nährstoffmangel auszuschließen sind, ist zu erwarten, daß relativ hoher bzw. niedriger Rüben-ertrag und durchschnittliches Rübengewicht mit relativ niedrigen bzw. hohen Nematodenvorkommen gekoppelt ist. In den Tabellen 14 und 15 sind die Resultate zusammengestellt. Dabei wurden diejenigen Zysten-Auszählergebnisse einer Parzelle, welche bei unterschiedlichen Erträgen derselben Befallsklasse zuzuordnen sind, mit x gekennzeichnet; mit xx versehen wurden solche, die sich zu den Ertragswerten umgekehrt verhalten. Daraus wird ersichtlich, daß die ermittelten Nematodenpopulationen nicht immer den Ertragsniveaus entsprechen.

V.2 SPEKTRALE REFLEXIONSMESSUNGEN

Die am Spektralphotometer im Labor durchgeführten Reflexionsmessungen (Methodik s. IV.3.1) sollten Aufschlüsse über die spektralen Reflexionseigenschaften nematodengeschädigter und nicht geschädigter Zuckerrübenpflanzen erbringen. Die Meßresultate für den Spektralbereich 500 - 950 nm sind in den Tabellen 16 und 17 sowie in den Abbildungen 15 und 16 zusammengefaßt.

V.2.1 Turgide und nicht turgide Blätter

Die Reflexionsfaktoren (Definition s. KRIEBEL et al. (1975), KRIEBEL (1978 a) sowie BOEHNEL (1977)) der jeweils drei zur Messung entnommenen Stücke der einzelnen Blätter (s. Abb. 7) wiesen untereinander geringfügige Abweichungen auf. Diese Differenzen sind auf die An- oder Abwesenheit von Blattadern sowie deren Flächenanteile zurückzuführen und somit nicht konstant der Position der Entnahmestellen zuzuordnen. Die jeweilige Mittelung der drei erhaltenen Werte bei den einzelnen Wellenlängen ergibt demnach Größen, welche die Reflexion der gesamten Blattfläche repräsentieren. Die in Tab. 16 aufgelisteten spektralen Reflexionsfaktoren turgider und nicht turgider Zuckerrübenblätter lassen anhand der sehr niedrigen Variationskoeffizienten jeweils deutlich die Homo-

Tab. 14: Zusammenstellung: Turgide und geschädigte Parzellen der Testleitern; Gebiet Groß Gerau und Alzey

Testfeld	Rübenertrag dt/ha		Rüben-gewicht g/Rübe		Fenwick		Biotest	
	turgid	gesch.	turgid	gesch.	turgid	gesch.	turgid	gesch.
					(Zysten/100g Boden)		(Zysten/Versuchsgefäß)	
I 76	263	208	674	484	0	4	74 ^x	72 ^x
I 77	425	385	833	774			0 ^x	0 ^x
II 76	518	392	835	594			32 ^x	49 ^x
II 77	475	365	599	404	2 ^x	1 ^x	0 ^x	1 ^x
III 76	625	20	1078	46			1	60
IV 76	534	394	989	691			11	136
V 77	435	250	674	443	1 ^x	2 ^x	0 ^x	0 ^x
VI 77	470	368	736	803	0	3	0	0
VII 76	554	444	1030	522			63	89
VII 77	490	330	794	517	3 ^x	1 ^x	0	26
VIII 76	504	285	951	663			13 ^{xx}	0 ^{xx}
VIII 77	475	360	705	526	0 ^x	1 ^x	2 ^x	1 ^x
IX 77	505	410	791	567	0	5	17	63
X 76	414	266	881	831			45 ^x	57 ^x
XI 77	540	435	871	691	0	7	14	45
XII 77	635	470	1388	1027	0	2	53 ^{xx}	19 ^{xx}

Legende: mit x gekennzeichnet sind Nematodenuntersuchungswerte, die trotz geringerer Erträge in den geschädigten Subparzellen gemäß Tab. 4 derselben Schadklasse zuzuordnen sind; m xx sind diejenigen Werte markiert, welche bei höherem Ertrag in den turgiden Subparzellen einer höheren Schadstufe entsprechen und umgekehrt.

Tab. 15: Zusammenstellung: turgide und geschädigte Parzellen der Testleitern; Gebiet Ameln

Testfeld	Rüben-ertrag dt/ha turgid	Rüben-ertrag dt/ha gesch.	Fenwick turgid gesch. (Zysten/100 g Boden)	Biotest turgid gesch. (Zysten/Versuchsgefäß)
I 77	607	463	79 ^x 54 ^x	1 14
II 77	510	408	22 38	158 ^{xx} 40 ^{xx}
III 77	488	567	37 27	40 30
IV 77	514	437	37 70	60 ^{xx} 25 ^{xx}
V 77	441	438	20 34	16 40
VI 77	593	459	0 44	60 ^x 84 ^x
VII 77	567	533	25 ^{xx} 14 ^{xx}	94 ^{xx} 61 ^{xx}
VIII 77	576	499	9 39	50 100
IX 77	504	248	23 44	34 55
X 77	616	487	4 44	140 ^{xx} 81 ^{xx}

Legende: mit x gekennzeichnet sind Nematodenuntersuchungswerte, die trotz geringerer Erträge in den geschädigten Subparzellen gemäß Tab. 4 derselben Schadklasse zuzuordnen sind; mit xx sind diejenigen Werte markiert, welche bei höherem Ertrag in den turgiden Subparzellen einer höheren Schadstufe entsprechen und umgekehrt.

Tab. 16: Spektrale Reflexionsfaktoren (% R) turigder und nicht turigder Zuckerrübenblätter, entnommen von nicht geschädigten und nematodengeschädigten Pflanzen.
s = Standardabweichung; v % = Variationskoeffizient

	Groß Gerau (2. 9. 1977)	Ameln (9. 8. 1977)
(nm)	turgid % R s v%	nicht turgid % R s v%
500	6,85 0,03 0,44	6,58 0,03 0,46
520	9,77 0,09 0,92	9,87 0,08 0,81
550	13,58 0,20 1,47	14,22 0,14 0,98
580	10,30 0,11 1,07	10,87 0,09 0,83
600	9,21 0,08 0,87	9,60 0,07 0,73
620	8,05 0,06 0,75	8,46 0,05 0,60
640	7,43 0,04 0,54	7,76 0,05 0,64
660	6,71 0,02 0,30	6,93 0,03 0,43
680	9,17 0,04 0,44	9,41 0,06 0,64
700	17,30 0,15 0,87	18,04 0,15 0,83
725	32,84 0,45 1,37	34,32 0,56 1,63
750	42,89 0,92 2,15	44,23 1,20 2,71
775	45,54 1,15 2,53	47,86 1,27 2,74
800	46,05 1,22 2,65	48,27 1,04 2,16
825	46,08 1,20 2,60	48,34 1,02 2,11
850	46,14 1,20 2,60	48,48 0,97 2,00
875	46,22 1,19 2,57	48,64 0,93 1,86
900	46,21 1,19 2,58	47,99 0,95 1,98
950	45,55 1,25 2,74	48,27 0,79 1,64

Tab. 17: Spektrale Reflexionsfaktoren (% R) vergilbungsvirus-befallener Zuckerrübenblätter sowie von Blattstielen und trockenem Ackerboden

s = Standardabweichung, v% = Variationskoeffizient

(nm)	Virusvergilbung (Ameln 9.8.77)			Blattstiele (Groß Gerau 2.9.77)			Bodenoberfläche trocken								
	% R	S	v%	% R	S	v%	% R	S	v%	% R	S	v%			
500	9,46	0,11	1,16	12,97	0,15	1,16	9,42	1,05	11,15	8,43	1,14	13,52	10,20	0,56	5,49
520	17,97	0,44	2,45	19,88	0,34	1,71									
550	26,62	0,88	3,30	23,83	0,52	2,18	12,12	1,65	13,61	10,33	1,52	14,71	13,20	0,74	5,61
580	24,21	1,15	4,75	21,15	0,36	1,70									
600	22,79	1,25	5,48	19,77	0,30	1,52	14,65	2,05	13,99	12,10	1,83	15,12	16,05	0,73	4,55
620	21,01	1,32	6,28	18,12	1,23	1,27									
640	19,22	1,21	6,30	16,67	0,19	1,14	16,18	2,39	14,77	13,33	1,86	14,05	17,48	0,76	4,35
660	16,17	1,15	7,11	12,77	0,10	0,78									
680	20,48	1,40	6,84	15,02	0,12	0,80									
700	30,18	1,60	5,30	21,68	0,30	1,38	18,32	2,80	15,26	15,33	1,93	12,66	20,08	0,71	3,54
725	41,76	1,29	3,09	28,68	0,62	2,16									
750	45,81	1,06	2,31	31,10	0,80	2,57	20,22	3,09	15,28	17,00	1,61	9,51	22,05	0,83	3,76
775	46,48	0,99	2,13	31,55	0,86	2,73									
800	46,81	0,85	1,82	31,77	0,87	2,74	21,67	3,30	15,23	18,38	1,51	8,22	23,55	0,84	3,57
825	46,81	0,86	1,84	31,75	0,88	2,77									
850	46,82	0,84	1,79	31,57	0,88	2,79	22,85	3,46	15,13	19,68	1,33	6,81	24,90	0,87	3,49
875	46,80	0,85	1,82	31,35	0,90	2,87									
900	46,81	0,84	1,79	30,60	0,89	2,91	23,85	3,49	14,63	20,85	1,35	6,52	26,05	0,93	3,57
950	46,16	0,77	1,67	27,10	0,87	3,21	24,92	3,62	14,52	21,90	1,34	6,12	27,28	0,99	3,63

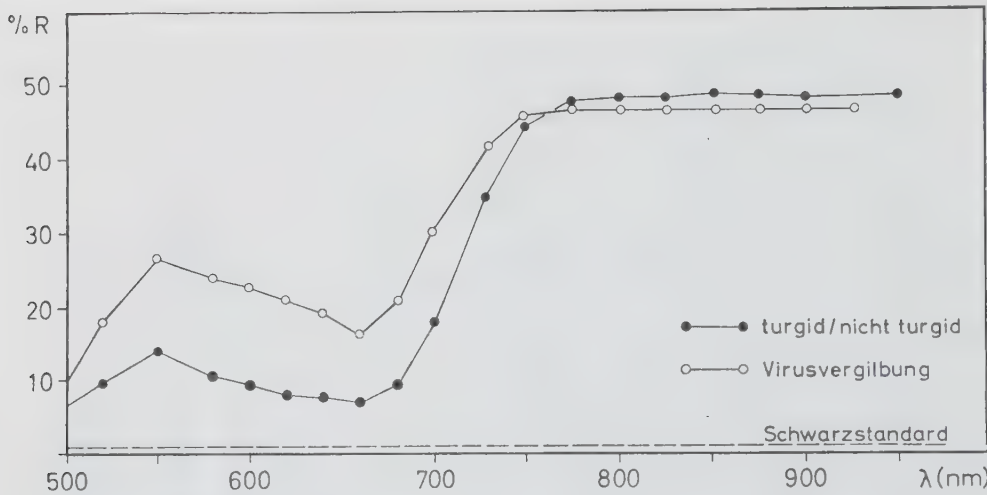


Abb. 15

Spektrale Reflexion von turgiden und nicht turgiden Blättern nicht geschädigter bzw. nematodengeschädigter Zuckerrübenpflanzen sowie von Vergilbungsvirus-befallenen Pflanzen

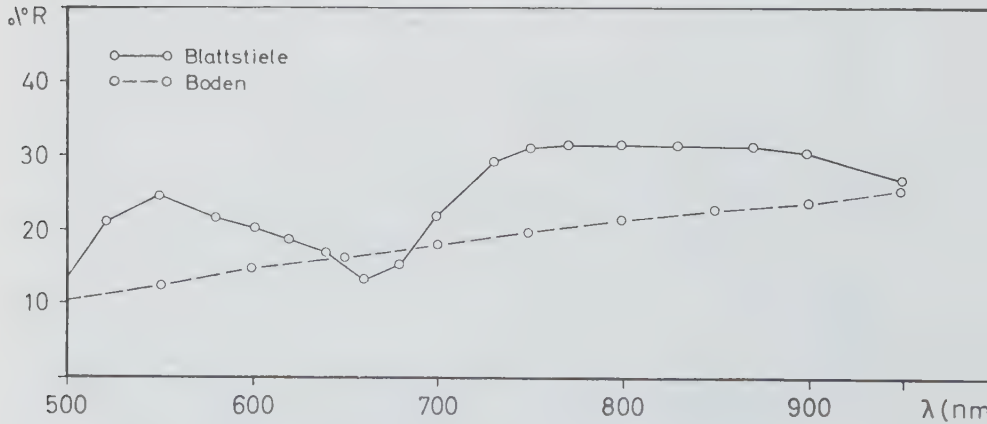


Abb. 16

Spektrale Reflexion von Blattstielen und Boden

genität des Untersuchungsmaterials erkennen. Ein Vergleich der einzelnen Reflexionsfaktoren durch die Berechnung der prozentualen Differenzen zwischen turgiden (= 100 %) und nicht turgiden Blättern ergab, daß sowohl im sichtbaren als auch insbesondere im infraroten Spektralbereich nur sehr geringe Unterschiede bestehen (s. Tab. 18, Sp. 2 und 3 sowie Abb. 15). Eine mit Hilfe des t-Tests durchgeführte Überprüfung der Signifikanz dieser Differenzen ergab, daß im Spektralbereich zwischen 725 und 950 nm die ermittelten Unterschiede nicht signifikant und somit der Variabilität der jeweils untersuchten Blattgruppen zuzuschreiben sind. Die im sichtbaren Spektralbereich festgestellten Signifikanzen bei $p = .05$ sind für die Gesamtaussage der Resultate von untergeordneter Bedeutung, da sie bei einer vergleichenden Gegenüberstellung der Meßergebnisse von Blättern aus den Gebieten Ameln und Groß Gerau (Tab. 18, Sp. 2 und 3) bei den jeweiligen Wellenlängen nicht einheitlich vorliegen, und zudem die unterschiedlichen Vorzeichen der Differenzen nicht berücksichtigen. Gemäß der in II.3.1 beschriebenen Zusammenhänge sind die Reflexionsunterschiede im Bereich des sichtbaren Lichts mit geringfügig veränderten Pigmentgehalten zu erklären. Aufgrund der Streuverluste auf dem Weg der reflektierten Strahlung durch die Atmosphäre und der Charakteristiken der spektralen Sensibilität des IRC-Films sind diese Differenzen trotz ihrer rechnerischen Signifikanz für die Fernerkundung nicht relevant.

V.2.1.1 Zusammenhänge zwischen anatomischem Blattaufbau und spektralen Reflexionseigenschaften

An dieser Stelle sollen die Ergebnisse der anatomisch-mikroskopischen Untersuchungen dargestellt und erläutert werden. Die Bilder 3 und 4 geben jeweils ein repräsentatives Beispiel aus den angefertigten Serienschnitten wieder.

Aufgrund der verminderten Wasserzufuhr weisen die Blätter stark neamtodenbefallener Pflanzen eine geringere Dicke auf als turgide Blätter. Im Bereich des Schwammparenchyms sind erhebliche Unterschiede zwischen den beiden Zustandsformen zu erkennen; sie liegen im wesentlichen in der Größe und Anzahl der interzellulären Lufträume relativ zu den Zellen.

Diese Befunde lassen nach der in II.2.1 dargestellten Theorie von WILLSTÄTTER & STOLL (1918) und der Hypothese von SINCLAIR et al.

Tab. 18: Prozentuale Differenzen zwischen den spektralen Reflexionsfaktoren turgider Zucker-
rübenblätter (= 100 %) einerseits und nicht turgider und vergilbungsvirusgeschädigter
Blätter sowie von Blattstielen und trockenen Bodenoberflächen andererseits. Die Zahlen-
werte geben die Abweichungen in % von den turgiden Blättern an.
Unterstrichene Werte der Spalten 2 und 3: Signifikanz der Differenz bei $p = .05$

nm	turgide Blätter/ nicht turgide Blätter		turgide Blät- ter/Blattstiele	turgide Blätter/trockene Bodenoberfläche		turgide Blätter/ virusbefallene Blätter
	Ameln	Groß Genau		Ameln	Groß Genau	
Spalte	1	2	3	4	5	6
500	+ 0	- <u>3,5</u>	+ 89,3	+ 43,2	+ 23,1	+ 43,8
520	- <u>1,2</u>	- <u>1,7</u>	+ 103,5			+ 82,1
550	- 0,4	- <u>1,0</u>	+ 75,5	- 14,8	- 23,9	+ 87,2
580	+ <u>1,3</u>	- 0,5	+ 105,3			+ 122,7
600	+ <u>3,5</u>	- <u>1,0</u>	+ 114,7	+ 52,6	+ 31,4	+ 137,4
620	+ <u>2,8</u>	- <u>0,6</u>	+ 125,1			+ 148,4
640	+ <u>3,7</u>	- <u>1,4</u>	+ 124,4	+ 118,4	+ 88,5	+ 147,7
660	+ <u>3,5</u>	- <u>0,3</u>	+ 90,3			+ 133,3
680	+ <u>1,2</u>	+ 0	+ 69,8			+ 117,6
700	- <u>1,65</u>	+ 0,4	+ 25,3	+ 1,6	- 11,4	+ 67,3
725	- 0,7	+ 0,4	- 12,7			+ 21,7
750	+ 1,0	- 0,4	- 27,5	- 54,3	- 60,4	+ 3,6
775	- 0,5	- 0,7	- 30,7			- 2,9
800	- 0,2	- 0,8	- 31,0	- 55,1	- 60,1	- 3,0
825	- 0,3	- 0,7	- 31,1			- 3,2
850	- 0,6	- 0,5	- 31,6	- 52,9	- 57,4	- 3,4
875	- 0,7	- 0,5	- 32,2			- 3,8
900	+ 0,3	- 0,5	- 33,8	- 50,3	- 54,9	- 2,5
950	- 1,9	- 0,3	- 40,5	- 48,4	- 51,9	- 4,4

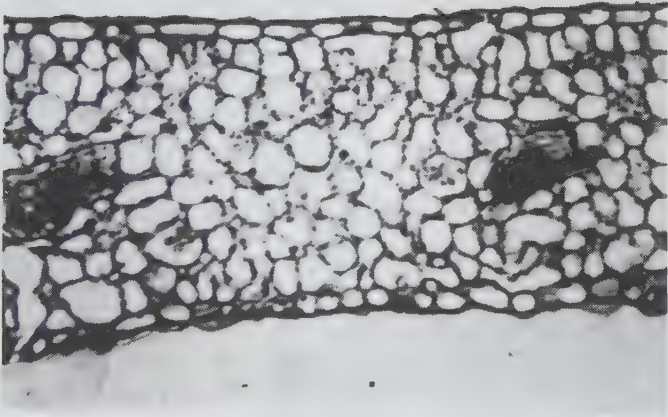


Bild 5 Querschnitt durch ein turgides Blatt einer nicht befallenen Zuckerrübenpflanze. Vergrößerung 64-fach

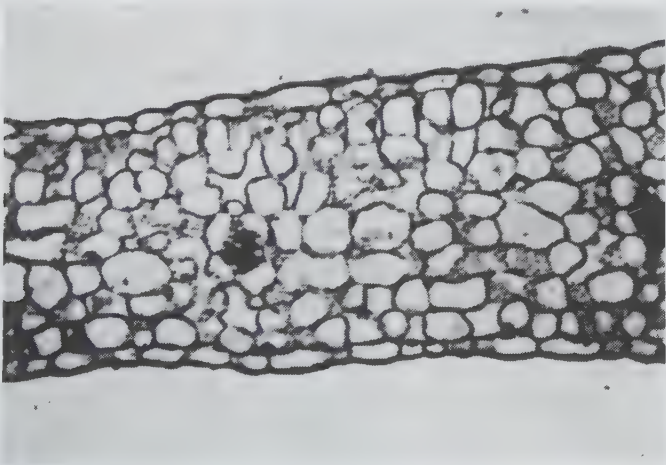


Bild 4 Querschnitt durch ein nicht turgides Blatt einer nematodenbefallenen Zuckerrübenpflanze. Vergrößerung 64-fach

(1973) größere Reflexionsunterschiede zwischen turgiden und nicht turgiden Blättern, insbesondere im Spektralbereich 725-950 nm, vermuten. Die im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigten Resultate der spektralphotometrischen Reflexionsmessungen zeigen jedoch keine Übereinstimmung mit den Aussagen jener Autoren. Die Suche nach Erklärungsmöglichkeiten für diese Abweichung von bekannten und öfter bewiesenen Regeln (GAUSMAN et al. 1969, 1970 c, 1970 d, 1971 c, GAUSMAN 1974, GATES, 1970, WIEGAND et al. 1972, u.a.) geht weit über die Zielsetzung dieser Arbeit hinaus; es soll aber darauf hingewiesen werden, daß die bekannten Postulate zum Verlauf des Lichtes durch ein Blatt bislang noch Theorien und Hypothesen, nicht aber Lehrsätze von allgemeiner Gültigkeit sind.

V.2.1.2 Schlußfolgerungen und Aspekte der Reflexionseigenschaften von Pflanzen im Bestand

Nachdem die spektralphotometrischen Reflexionsmessungen keine eindeutigen Differenzierungsmöglichkeiten zwischen nematodengeschädigten und nicht geschädigten Zuckerrübenpflanzen erkennen ließen, könnte daraus zunächst die Schlußfolgerung abgeleitet werden, daß auch Luftbildaufnahmen nicht das geeignete Mittel zur Lösung dieser Aufgabe sind. Diese Feststellung ist jedoch nur unter der Voraussetzung zulässig, daß beide Zustandsformen in situ keinerlei erkenn- oder meßbare Unterschiede aufweisen. Wie in III.2.1 beschrieben, sind aber geschädigte Pflanzen dadurch gekennzeichnet, daß ihre Blätter bei warmen, trockenen Witterungsverhältnissen aufgrund des Turgorverlustes im Vergleich zu denjenigen nicht geschädigter Pflanzen veränderte Winkelstellungen aufweisen. Das Ausmaß dieser Veränderungen ist dabei abhängig vom Grad des Turgorverlustes. Generell äußern sie sich zunächst in einer von der Spitze her beginnenden Erschlaffung und Absenkung der Blattspreite; bei weiter abnehmendem Turgor verliert auch der Blattstiel seine Festigkeit und senkt sich mit dem Blatt zum Boden hin ab. Im Falle schwerer Schädigung schließlich liegt das Blatt gänzlich flach auf der Bodenoberfläche auf. Die Bilder 5 bis 7 verdeutlichen diese Beschreibung. Sie lassen auch erkennen, daß bei einem Schlaffen der Blätter die Schattenräume zwischen Blätterdach und Boden abnehmen und dazuhin Blattstiele und Teile der Bodenoberfläche exponiert werden. Die Reflexionseigenschaften von Pflanzen ändern sich mit einer Ver-



Bild 5

Nicht geschädigte, voll
turgide Zuckerrübenpflan-
zen.

Senkrechtaufnahme aus 2 m
Höhe

Bild 6

Geschädigte Zuckerrüben-
pflanzen mit mäßigem
Turgorverlust.

Senkrechtaufnahme
aus 2 m Höhe

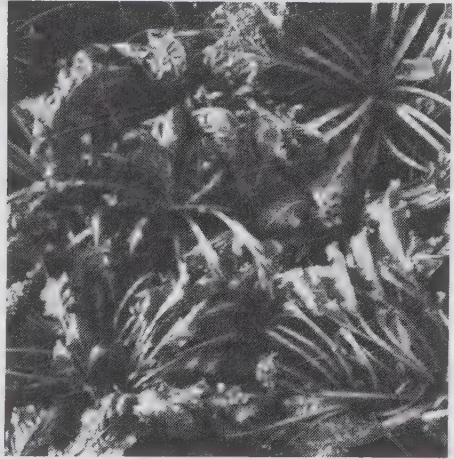
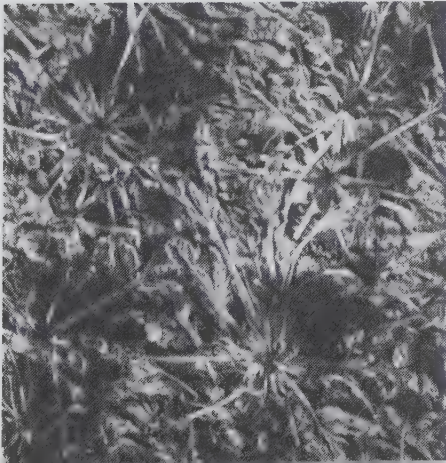


Bild 7

Schwer geschädigte Zucker-
rübenpflanze mit völligem
Turgorverlust.

Senkrechtaufnahme aus 2 m
Höhe



änderung der Winkelstellung der Blätter, da die Richtungscharakteristik der reflektierten Strahlung von der relativen Position der Objekte zur Strahlungsquelle abhängig ist (HILDEBRANDT 1976, SUITS 1977). Eine schematische Darstellung des Vorganges gibt Abb. 17 in stark vereinfachter Form wieder. Sie zeigt, wie neben der Richtungsänderung auch eine Wandlung von stark diffuser zu gerichteter Reflexion erfolgt. Aufgrund der verminderten Anzahl und Größe von Schattenräumen ist eine insbesondere im sichtbaren Spektralbereich erhöhte Reflexionsintensität zu erwarten (RICHARDSON et al. 1975).

Wie aus einem Vergleich der Bilder 6 und 7 mit Bild 5 hervorgeht, liegt der wohl gewichtigste Anteil für eine Änderung der Rückstrahlungseigenschaften unter Turgorverlust leidender Pflanzen in der Exposition von Blattstielflächen (SANWALD & HILDEBRANDT 1978). Wie ein Vergleich der spektralphotometrisch bestimmten Reflexionscharakteristiken von Blattstielen und turgiden Blättern zeigt, liegen insbesondere im grünen und roten Spektralbereich erhebliche Differenzen vor (Tab. 18, Sp. 4 und Abb. 16).

Der Einfluß freigelegter Bodenoberflächenanteile ist dagegen als relativ gering zu veranschlagen, da bei geschlossenem Pflanzenbestand auch schlaffende Blätter den Boden weitgehend abdecken. In Tab. 17 und Abb. 16 sind die Reflexionseigenschaften trockenen Bodens aus den drei Untersuchungsgebieten wiedergegeben. Für die starken Schwankungen der - aus den Messungen von Proben aus 5 verschiedenen Testfeldern gleichen Bodentypus der einzelnen Testgebiete - ermittelten Werte sind in erster Linie unterschiedliche Partikelgrößen in den Meßproben und die Folgen unterschiedlicher Düngemaßnahmen verantwortlich. Dementsprechend sind die Resultate aus dem Gebiet Alzey (homogene Lössböden) mit vergleichsweise geringen Abweichungen behaftet. Die Reflexionsunterschiede zu Blättern sind insbesondere im Rot und im Nahen Infrarot deutlich ausgeprägt (Tab. 18).

Zusammenfassend ist die Schlußfolgerung zu ziehen, daß eine Erfassung nematodengeschädigter Bestandesteile in Zuckerrübenfeldern mit Hilfe von Luftbildaufnahmen möglich ist. Dabei sind als die Ursache für die Differenzierung nicht die Reflexionscharakteristika der Blätter per se, sondern die Einzelheiten der unterschiedlichen dreidimensionalen Gestalt der Bestandesdecke zu sehen.

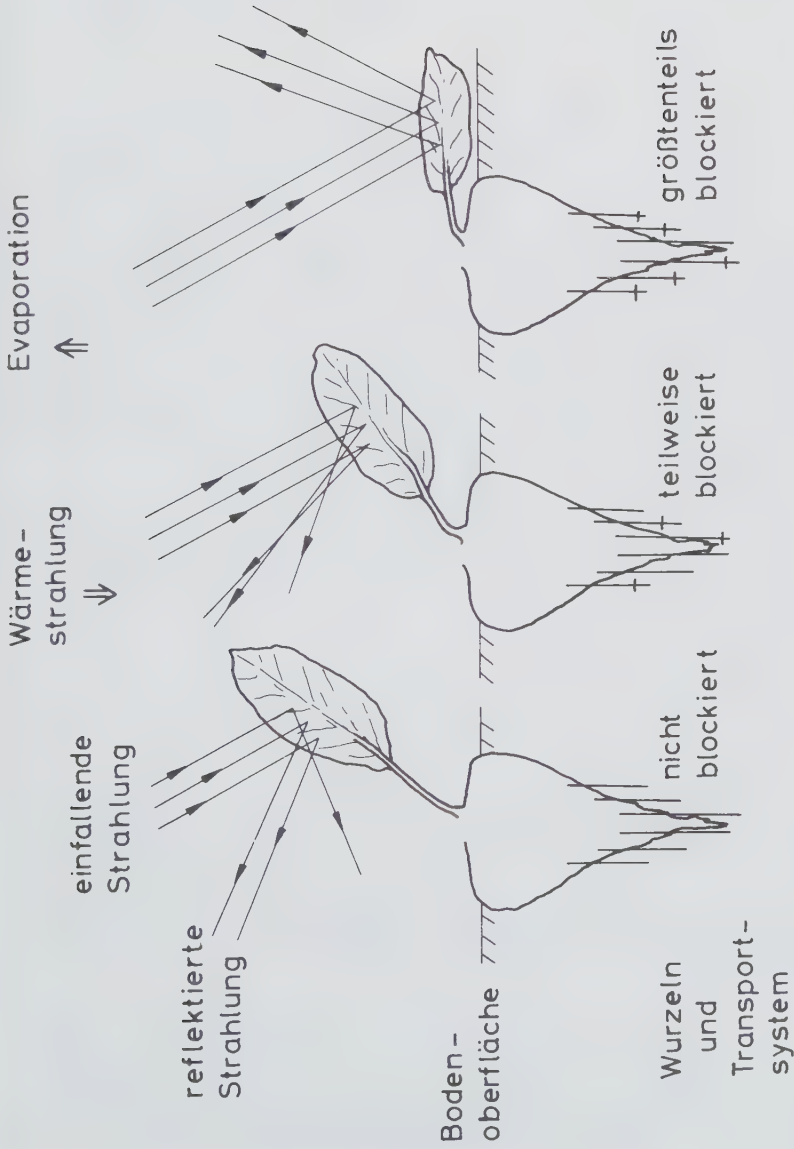


Abb. 17

Schematische Darstellung der Zusammenhänge zwischen nematodenbefallsbedingtem Turgorzustand der Zuckerrübenpflanzen und ihren Reflexionseigenschaften

V.2.2 Vergilbungsvirus-geschädigte Blätter

Blätter, welche Symptome des Befalls durch das Vergilbungsvirus aufweisen, sind gegenüber den Blättern gesunder und nematodengeschädigter Zuckerrübenpflanzen durch deutliche Reflexionsunterschiede gekennzeichnet.

Die relativ hohen Schwankungen der gemessenen Reflexionsfaktoren kommen durch die unterschiedlichen Krankheitsstadien (d.h. verschiedenes Ausmaß und Verteilung vergilbter Blattareale) zustande (Tab. 17). Im gelben und roten Spektralbereich reflektieren virusgeschädigte Blätter erheblich stärker als turgide oder nicht turgide Blätter; im Nahen Infrarot liegen dagegen keine nennenswerten Differenzen vor (Tab. 18, Sp. 7, Abb. 15). Reflexionswirksame Unterschiede im Habitus der Pflanzen bestehen hier nicht. Allein die deutliche Farbveränderung müßte- im Hinblick auf die Resultate von MANZER & COOPER (1976), CARDENAS et al. (1972) sowie GAUSMAN et al. (1974) - theoretisch ausreichen, um kranke Pflanzen bzw. Pflanzengruppen im Luftbild erkennen zu können.

In den folgenden Abschnitten wird dargestellt werden, ob und inwieweit die aus den spektralphotometrischen Reflexionsmessungen und Freilandbeobachtungen gezogenen Schlußfolgerungen zutreffen.

V.3 LUFTBILDAUSWERTUNG

V.3.1 Klassifikation von Zuckerrübenfeldern

V.3.1.1 Visuelle Interpretation

Bei der visuellen Luftbildauswertung versucht der Interpret zwischen Farbe bzw. Grauton und geometrischer Form sowie den Textureigenschaften der Bildinhalte einerseits und seinem fachlichen Wissen und der Kenntnis von der Bildentstehung andererseits Beziehungen herstelle, um daraus Zusammenhänge zwischen dem Bild und dessen Inhalten abzuleiten und die Identität der Objekte und ihrer Eigenschaften zu erfassen.

Im Rahmen der gegebenen Fragestellung bedeutet dies die Erkennung und Identifizierung der einzelnen Feldfrüchte, wobei die eindeutige Klassifizierung von Zuckerrübenfeldern im Vordergrund steht. Ohne die Lösung dieses Problems kann logischerweise auch das Ziel der Erkennung von Nematodenschäden in Zuckerrübenfeldern nicht erreicht

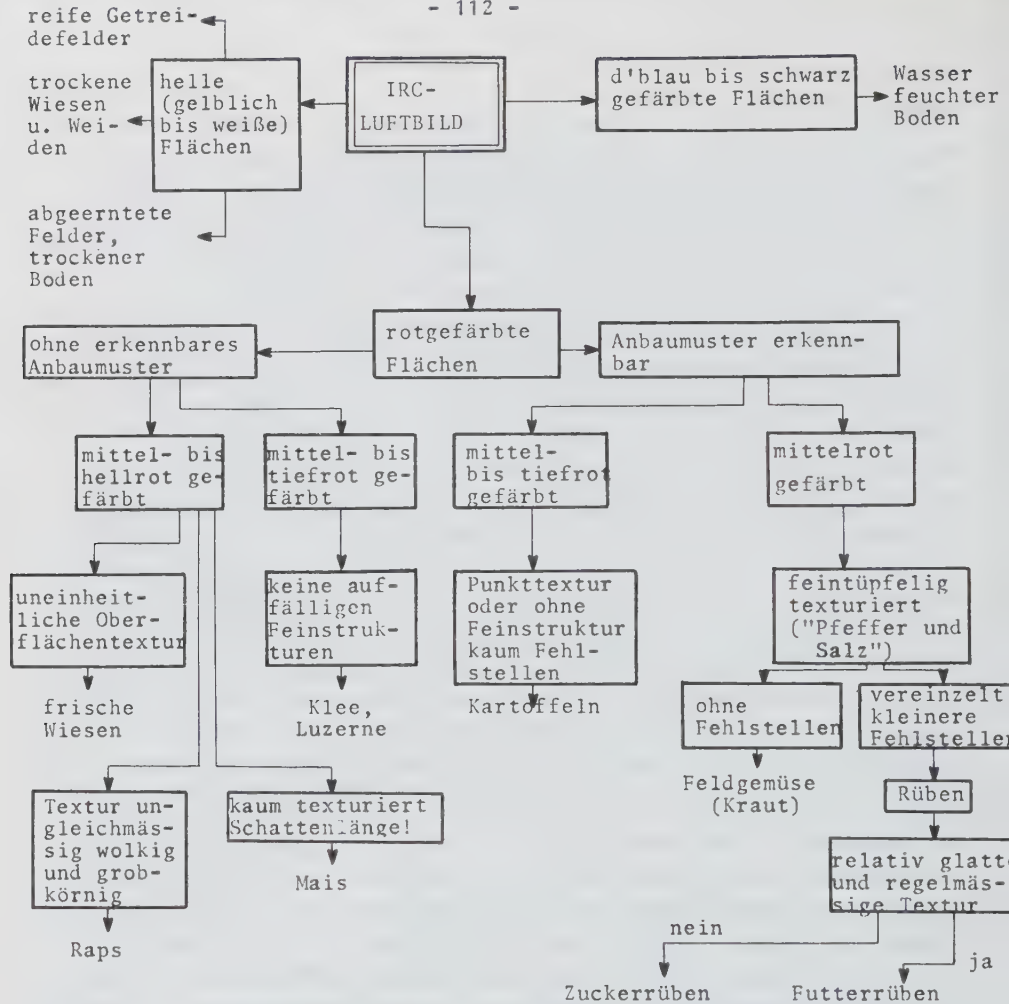
werden.

Nach der in IV.5.1 beschriebenen Verfahrensweise konnte ein dichotomer Klassifizierungsschlüssel für die Interpretation landwirtschaftlicher Bildinhalte von Infrarot-Farbluftaufnahmen, welche im Zeitraum von Mitte Juni bis Ende August entstehen, erstellt werden (Abb. 18). Die darin angeführten Bezeichnungen für die Art der jeweiligen Oberflächentextur wurden von MEIENBERG (1966) übernommen.

Die Resultate der darauf aufbauenden Bildauswertung und die erreichte Klassifizierungsgenauigkeit sind in Tab. 19 (s.S. 113) zusammengefaßt. Die durch Vergleiche der Auswerteresultate mit den Gegebenheiten im Gelände bestimmten Trefferquoten liegen zwischen 96,8 und 100 %; das bedeutet, daß auf IRC-Aufnahmen bis zu einem Bildmaßstab von 1 : 10 000 abgebildete Zuckerrübenfelder bei der visuellen Bildauswertung mit hoher Sicherheit als solche angesprochen werden können. Die aufgetretenen Fehlklassifikationen betrafen im Gebiet Groß Gerau ausschließlich Gemüse- und in der Umgebung von Ameln Kartoffelfelder. In der Region Alzey schließlich, welche durch den Anbau von Wein, Getreide und Zuckerrüben gekennzeichnet ist, bestanden keine Verwechslungsmöglichkeiten, so daß hier eine Genauigkeit von 100 % erreicht werden konnte.

Die in den Bildrandbereichen aufgrund der Objektivcharakteristik auftretende Vignettierung sowie die Helligkeitsunterschiede unterschiedlicher Bildortlagen (Mitlicht- und Gegenlichtbereich) und damit einhergehende Farbverschiebungen können die Interpretationsgenauigkeit negativ beeinflussen (STEINER et al. 1969, FRINKING 1972). Diese Fehlerquelle wird jedoch dadurch weitgehend beseitigt, daß bei einer Längsüberlappung von 60 % der Bildrandbereich einmal im Mitlicht und einmal im Gegenlicht abgebildet wird, so daß vergleichende Betrachtungen möglich sind. Selbst 20 - 30 % Längsüberdeckung reichen für einen intellektuellen Ausgleich der Farbverschiebungen bei der visuellen Interpretation aus. In dieser Fähigkeit des menschlichen Gehirns, Farbveränderungen abstrahieren zu können, liegt einer der wesentlichen Vorteile der visuellen gegenüber der computergestützten Luftbildinterpretation.

Die Flächeninhalte der durch die Bildinterpretation und verglichen- de Geländebegehungen klassifizierten Zuckerrübenschnitte wurden mit Hilfe eines Digitizers im Rechenzentrum der Universität Freiburg ermittelt. Zur Berechnung der Feldflächen, welche durch die Ver-



Anmerkungen:

Dieser Klassifizierungsschlüssel bezieht sich auf Befliegungen im Zeitraum Juni-August. Dabei sind die Bezeichnungen tief- mittel- und hellrot selbstverständlich subjektive Kriterien. Dennoch sind sie als Klassifizierungsmerkmale brauchbar, da sich die Ausbildung der Gesamtheit der im Bild enthaltenen Farbcharakteristik je nach Emulsion, Entwicklung und Aufnahmebedingungen von Film zu Film verschiebt und eine Absolutierung durch Standardvergleiche unmöglich macht.

Abb. 18

Dichotomer Klassifizierungsschlüssel zur Auswertung von IRC-Luftaufnahmen bezüglich landwirtschaftlicher Bildinhalte

Tab. 19: Resultate der Klassifikation von Zuckerrübenfeldern bei der Interpretation von IRC-Luftaufnahmen

Gebiet	Groß Gerau				Ameln			Alzey	
	1976 abs. %	1977 abs. %	1976+1977 abs. %	1976 abs. %	1977 abs. %	1976+1977 abs. %	1977 abs. %		
ZR-Schläge gesamt	100 100	156 100	256 100	162 100	181 100	343 100	310 100		
Klassifikationsergebnisse	97 97	151 96,8	248 96,9	159 98,2	179 98,9	338 98,5	310 100		

bindungslinien zwischen den nach x/y-Koordinaten digitalisierten Begrenzungspunkten definiert sind, wird das Modul "Bestimmung des Flächeninhaltes geschlossener Polygonzüge" aus dem Softwarepaket FIPS (Freiburg's Image Processing System) nach LANGE (1977 und 1978) verwendet. Die danach bestimmten Größen der erfaßten Rübenanbauflächen in den jeweiligen Testgebieten sind ebenso wie die durchschnittliche Feldgröße und der Flächenanteil der Felder mit Nematodenschäden (s. V.3.4) in Tab. 24, Z. 7-10 zusammengestellt.

Damit wird eine weitere Nutzungsmöglichkeit von Luftbildaufnahmen im landwirtschaftlichen Bereich angedeutet, welche - gleichsam als Nebenprodukt - Informationen agrarstatistischer Art erschließen kann.

V.3.1.2 Densitometrische Messungen

Mit den am Bildmaterial durchgeführten Dichtemessungen sollten, wie bei HANSEN (1973) und ROHDE (1977) beschrieben,

- (a) Helligkeits- und Farbwertverschiebungen in Abhängigkeit vom Bildort und
- (b) Helligkeits- und Farbwertdifferenzen zwischen Rübenfeldern einerseits und Kartoffel- und Gemüsefeldern andererseits quantifiziert werden.

Die densitometrischen Meßwerte von jeweils 10 - 15 Einzelmessungen (je nach Feldgröße) der Transmission bei weißem Licht sowie Blau-Grün- und Rotfilterung an den einzelnen abgebildeten Feldflächen wurden zur Errechnung der Farbwerte r, g und b verwendet, wobei

$$r = \frac{T_R}{T_R + T_G + T_B}, \quad g = \frac{T_G}{T_R + T_G + T_B} \quad \text{und} \quad b = \frac{T_B}{T_R + T_G + T_B}$$

(T_R , T_G , T_B = Transmissionsanteile in % bei Rot-Grün- und Blau-filterung).

Die in den Tab. 20 und 21 angeführten Resultate sind jeweils die Mittelwerte aus den Einzelmessungen.

Zur Feststellung der unter (a) genannten Veränderungen wurden Messungen an einem nicht befallenen Rübenfeld homogener Oberfläche aus dem Gebiet Ameln durchgeführt. Bei 80 % Längsüberdeckung der Befliegung vom 22. 8. 1976 konnte dieses Feld in 6 verschiedenen Bildorten erfaßt werden (Abb. 19, Tab. 20). Die Helligkeitsunterschiede (Minimum der Helligkeit im Gegenlichtbereich, Maximum in der Bildmitte und wiederum leichte Abnahme im Mitlichtbereich) kommen in den ermittelten Transmissionsintensitäten bei ungefiltertem

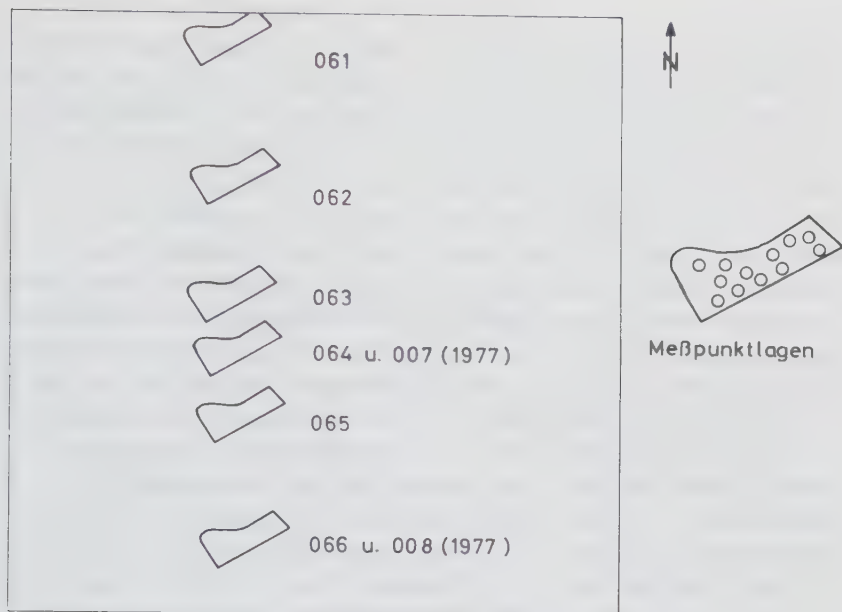


Abb. 19

Bildortlagen eines nicht geschädigten Zuckerrübenfeldes mit homogener Oberfläche aus dem Gebiet Ameln. $m_b = 1 : 10\ 000$; Befliegungszeitpunkte 22. 8. 1976 (Bild Nr. 061 bis 066) und 5. 8. 1977 (Bild Nr. 007 u. 008)

Tab. 20: Helligkeits- und Farbwertveränderungen einer Zuckerrübenfeldes mit homogener Pflanzendecke in Abhängigkeit von Bildort und Emulsion. $m_b = 1 : 10\ 000$; Befliegungszeitpunkte 22. 8. 1976 (Bild Nr. 061-066) u. 5. 8. 1977 (Bild Nr. 007 u. 008). Messungen am MacBeth Densitometer. T_W, T_R, T_G, T_B : Transmissionsanteile bei ungefiltertem weißem Mischlicht sowie bei Rot-Grün- und Blaufilter. r, g, b: Farbanteile Rot, Grün und Blau

Bild Nr.	T_W	T_R	T_G	T_B	r	g	b	Bildbereich
061	2,4	2,3	1,1	1,5	.471	.222	.307	Mitlicht
062	2,9	3,0	1,4	2,1	.467	.213	.320	
063	2,8	3,1	1,2	1,9	.497	.200	.303	
064	3,5	3,8	1,5	2,3	.498	.203	.299	Bildmitte
065	2,8	3,0	1,2	1,6	.515	.206	.279	
066	1,6	1,7	0,6	0,8	.542	.209	.249	Gegenlicht
007	23,2	23,6	13,4	45,3	.286	.162	.552	Bildmitte
008	15,2	16,0	8,1	32,4	.283	.143	.574	Gegenlicht

weißem Mischlicht (T_w) deutlich zum Ausdruck. Ebenso sind auch die Farbanteile relativ zur Bildmitte im Gegenlichtbereich auf Kosten des blauen Anteils zum Rot hin verschoben, und im Mitlichtbereich ist eine Erhöhung des grünen Farbanteils bei einer Abnahme des Rot zu verzeichnen.

Da dasselbe Feld im darauffolgenden Jahr abermals mit Rüben bestanden war, ergab sich die Möglichkeit, auch die Differenzen in der Farbwiedergabe der beiden Filme zu quantifizieren. Wenn auch am Material der Befliegung vom 5. 8. 1977 aufgrund der geringeren Längsüberdeckung nur 2 Bildorte (annähernd kongruent mit Bildorten der Vorjahresbefliegung, s. Abb. 18) gemessen werden konnten, so werden dennoch die erheblichen Differenzen, welche insbesondere in der dunst-, emulsions- und entwicklungsbedingten geringeren optischen Dichte und der Verschiebung der Farbbalance zum Blau hin liegen, deutlich, wobei davon ausgegangen werden kann, daß die phänologische Entwicklung der Kultur und damit auch die spektralen Reflexionseigenschaften der Pflanzendecke zu beiden Terminen annähernd gleich waren.

Aus der Kenntnis der spektralen Reflexionseigenschaften grüner Pflanzen und der spektralen Empfindlichkeit und Farbwiedergabecharakteristik des IRC-Films (NORMAN & FRITZ 1965, ANSON 1966, CORTEN 1966, FRITZ 1967, TARKINGTON 1968, TOTTERDELL & RAINS 1973) kann geschlossen werden, daß in den IRC-Luftbildern der rote Farbanteil in den Abbildungen der Zuckerrübenfelder überwiegt, daß die durch Grün wiedergegebene Reflexion des roten Spektralbereichs am relativ geringsten ist und die als Blau erscheinende Reflexion des Pflanzengrüns eine Zwischenstellung einnimmt.

Die spektralphotometrisch bestimmten Reflexionswerte von Einzelblättern sind nicht gleich denjenigen der Bestandesdecke, und sie sind auch von den spektralen Intensitäten verschieden, welche schließlich den Sensor nach dem Weg durch die erdnahe Atmosphäre erreichen. Die Unterschiede sind jedoch im wesentlichen nur gradueller Art, wobei die Messung der Blattreflexion höhere Werte ergibt als die eines Pflanzendaches (ALLEN & BROWN 1965, ALLEN & RICHARDSON 1968, COLWELL 1974, HILDEBRANDT 1976). Aufgrund der physikalisch-chemisch bedingten höheren Empfindlichkeit des Filmmaterials für kürzerwellige Strahlungseinwirkungen sowie der Charakteristiken des Filmaufbaus und der Farbwiedergabe - einem Spektralausschnitt kann eine

bestimmte Farbe zugeordnet werden, nicht aber umgekehrt (YOST 1971) - ist auch bei optimalen Emulsions- und Entwicklungsverhältnissen nicht zu erwarten, daß die Relationen der Farbanteile Rot, Grün und Blau denjenigen der spektralphotometrisch gemessenen Reflexionsintensitäten in den Spektralbereichen 700 - 950 nm (Infrarot), 600 - 680 nm (Rot) und 520 - 580 nm (Grün) genau entsprechen, wohl aber, daß $r > b > g$. Aus einer Arbeit von McDOWELL & SPECHT (1974) ist zu entnehmen, daß Messungen der spektralen Transmissionsintensitäten von Bildinhalten allein zwar die Reflexionseigenschaften der abgebildeten Objekte nicht exakt wiedergeben können, wohl aber zuverlässige Anhaltspunkte zur quantitativen Verteilung ihrer spektralen Reflexion vermitteln. Dies konnte anhand des Bildmaterials des Jahres 1976 bestätigt werden. Für die Aufnahmen von 1977 trifft dies nicht zu; hier ist $b > r > g$. Der dafür verantwortliche Ursachenkomplex wurde im vorangegangenen Absatz bereits genannt)¹. Daß auch diese Fotografien noch mit großer Genauigkeit visuell interpretierbar waren, ist neben der bei der gegebenen Bildschärfe guten Erkennbarkeit von Textureigenschaften auf die Relativierung der Farbeindrücke durch das menschliche Gehirn zurückzuführen (s.a. ALBERTE 1970). Aus den gleichen Gründen haben auch Dichte- und Farbverschiebungen bei unterschiedlichen Bildortlagen, wie sie aus Tab. 20 ersichtlich sind, keine nennenswerten Einflüsse auf die visuelle Auswertegenauigkeit, wobei im übrigen zu bedenken ist, daß die extremen Positionen (Bild Nr. 061 bzw. 066) schon bei 20 - 30 % Bildüberdeckung je einmal im Mitlicht- bzw. Gegenlichtbereich abgebildet werden.

)¹ Um Standardvergleiche zwischen den Farbwiedergabecharakteristiken von Filmen verschiedener Befliegungen desselben Gebietes zu ermöglichen und gegebenenfalls - insbesondere bei digitaler Bildauswertung - Korrekturparameter zu ermitteln, empfiehlt sich jeweils die Messung eines konstant reflektierenden Objektes (z.B. Asphaltstraße).

Die Resultate der densitometrischen Messungen zur Untersuchung der Unterscheidungsmöglichkeiten der unter (b) genannten Kulturen anhand ihrer Helligkeit (T_W) und ihrer Farbzusammensetzung (r, g, b) sind in Tab. 21 zusammengestellt. Dabei wurden die Felder entsprechend ihrer Bildortlagen (s. Abb. 20 und 21) kombiniert, um Vergleiche zu ermöglichen.

Zur statistischen Prüfung der Mittelwertsdifferenzen wurde jeweils der t-Test für 2 unabhängige Stichproben angewendet. Die erhaltenen Werte für t und die Signifikanzen sind in Tab. 21 mit verzeichnet.

Die Resultate der statistischen Signifikanzprüfung bestätigen und erklären die sehr gute Trennbarkeit der untersuchten Kulturen voneinander auf meßtechnischem Weg. Wenn auch durch die inhomogene Helligkeitsverteilung im Luftbild Meßfehler entstehen können (SCHWIDEFSKY 1960, MEIENBERG 1966, STEINER et al. 1969) und die zum Vergleich herangezogenen Flächen keine identischen Bildortlagen aufweisen, so deuten die Ergebnisse doch zunächst darauf hin, daß bei der visuellen Bildauswertung auftretende Klassifizierungsprobleme durch die Anwendung von Meßverfahren gelöst werden können. Allerdings ist anzunehmen, daß die wenigen Fehlklassifizierungen bei der visuellen Interpretation (s. V.3.1.1) auf besonders gelagerte Reflexionsverhältnisse zurückzuführen sind, so daß in diesen Fällen auch die Farbmessung keine Verbesserung der Resultate ermöglichen kann.

V.3.2 R_∞)¹ und Blattflächenindex (BFI)

Mit der Untersuchung der Beziehungen der beiden Größen R_∞ und BFI (s. IV.3.2) zueinander sollte untersucht werden, welche Auswirkungen der BFI auf die spektralen Reflexionseigenschaften von Zuckerrübenblättern besitzt und inwieweit unter den in den jeweiligen Testgebieten vorliegenden Verhältnissen diesbezüglich konstante Abbildungseigenschaften von Zuckerrübenfeldern abgeleitet werden können.

Tab. 22 und Abb. 22 geben die Resultate der Reflexionsmessungen

)¹ die Bezeichnung R_∞ für den Grenzwert der Reflexionszunahme wurde von ALLEN & RICHARDSON (1968) übernommen

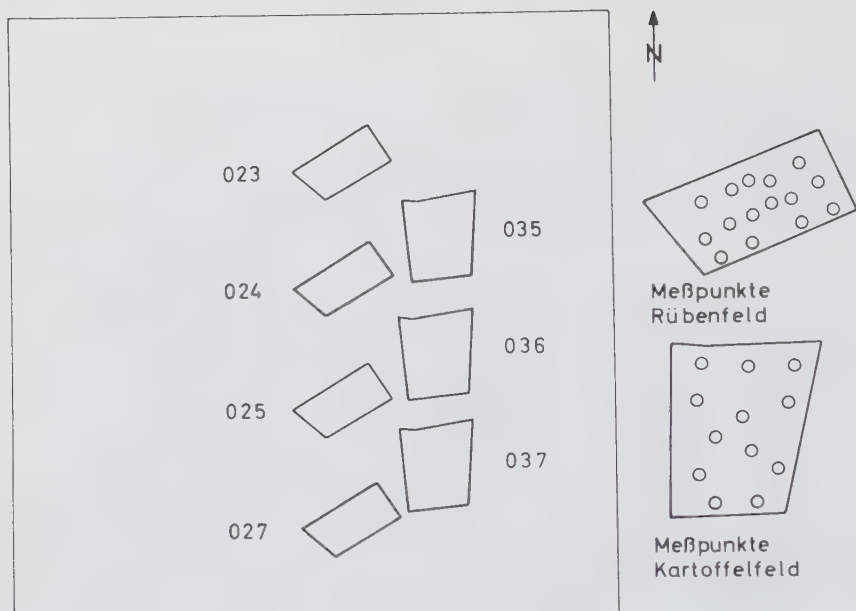


Abb. 20

Bildortlagen der densitometrisch vermessenen Rüben- und Kartoffelfelder im Gebiet Ameln. $m_b = 1 : 10\,000$, Befliegung vom 17. 6. 1976

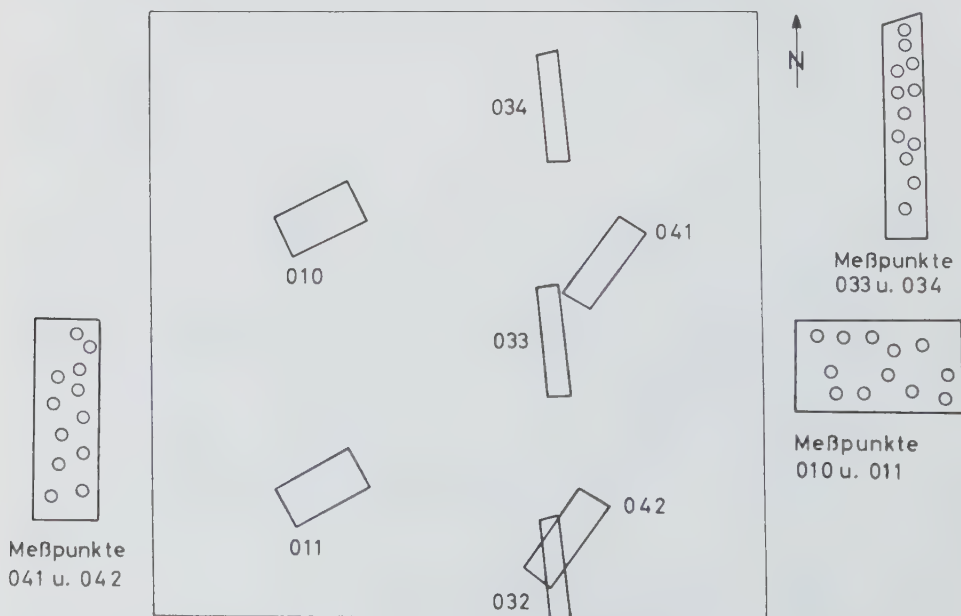


Abb. 21

Bildortlagen der densitometrisch vermessenen Rüben- und Kartoffelfelder im Gebiet Ameln. $m_b = 1 : 10\,000$, Befliegung vom 17. 6. 1976

Tab. 22: Meßwerte (% R) der spektralphotometrischen Bestimmung von R . Entnahme der Meßobjekte und Meßzeitpunkte: 2./3. 9. 1977, Gebiet Groß Gerau. Die angegebenen Differenzen, bezogen auf BFI von 1 = 100 %, sind nur für 700 - 950 nm genannt, da zwischen 500 und 680 nm keine weitere Reflexionserhöhung mehr erfolgt.

(nm)	BFI = 1	BFI = 2	Diff.%	BFI = 3	BFI = 4	BFI = 5	BFI = 6	BFI = 7	Diff.%	BFI = 8
500	7,2	7,1		6,9	7,0	6,8	6,6	6,4		6,3
520	10,5	10,3		10,1	10,1	9,8	9,8	9,5		9,5
550	15,1	15,1		14,9	15,0	15,0	14,8	14,9		14,9
580	11,7	11,6		11,6	11,3	11,1	11,1	10,9		10,6
600	10,5	10,5		10,2	9,7	9,7	9,6	9,4		9,5
620	9,1	8,9		9,0	8,8	8,7	8,5	8,2		8,4
640	8,4	8,0		8,0	7,9	7,7	7,8	7,6		7,6
660	7,5	7,5		7,5	7,8	7,4	7,5	7,4		7,4
680	10,4	10,4		10,3	10,4	10,2	10,0	10,2		10,2
700	19,4	20,8	+ 7,2	21,2	21,7	22,9	22,5	23,0	+ 18,6	22,7
725	34,9	40,6	+ 16,3	42,0	43,4	44,8	45,7	46,0	+ 31,8	45,9
750	44,4	53,4	+ 20,3	57,3	60,5	62,8	64,0	64,6	+ 45,5	62,8
775	46,8	57,2	+ 22,2	63,6	66,8	68,9	69,8	70,7	+ 51,1	68,6
800	47,2	58,0	+ 22,9	64,7	67,0	69,6	71,0	72,1	+ 52,8	69,1
825	47,3	58,4	+ 23,5	64,6	67,1	69,8	71,3	72,7	+ 53,7	69,2
850	47,4	58,8	+ 24,1	64,8	67,4	70,0	72,2	73,2	+ 54,4	69,8
875	47,6	59,0	+ 24,0	65,2	67,7	70,2	72,3	73,5	+ 54,4	70,1
900	47,6	58,0	+ 23,5	64,5	66,9	69,6	72,0	73,0	+ 53,3	68,9
950	46,9	57,7	+ 23,0	64,3	66,5	68,3	69,1	70,0	+ 49,3	66,7

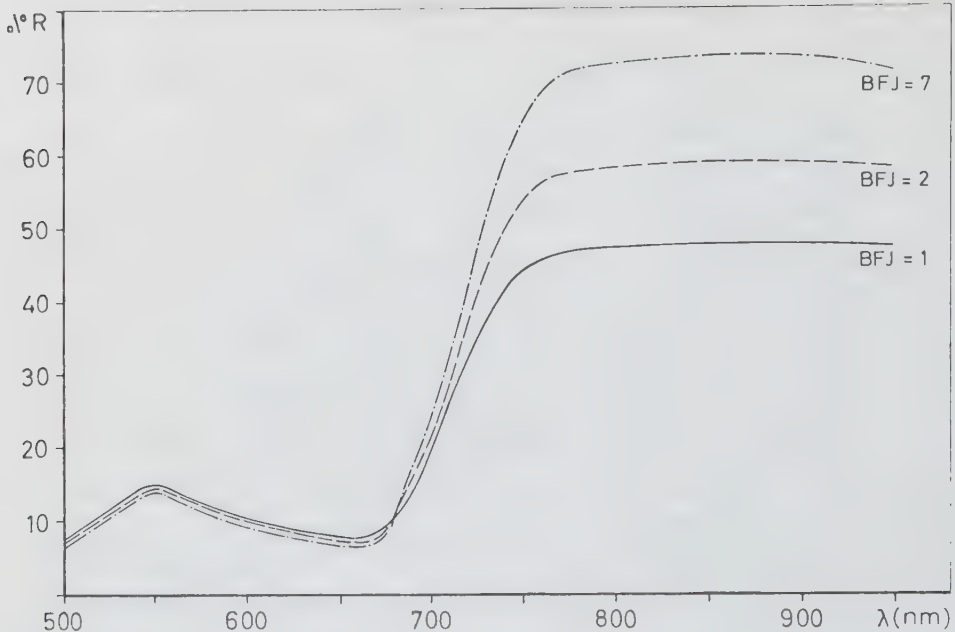


Abb. 22

Verlauf der spektralen Reflexion von Zuckerrübenblättern bei zunehmendem Blattflächenindex. Entnahme- und Meßzeitpunkt: 22./23. 8. 1977

Tab. 23: Durchschnittliche Blattflächenindices der drei Testgebiete bestimmt zu den jeweiligen Befliegungszeitpunkten 1977. Die zur Bestimmung der BFI-Werte führenden Zahlen sind jeweils Mittelwerte.

	G e b i e t		
	Ameln	Groß Gerau	Alzey
	Durchschnittswerte		
Anzahl Blätter je Pflanze	14	14	14
einseitige Blattfläche (cm ²)	218,6	213,4	220,3
Blattfläche je Pflanze (cm ²)	3 060,6	2 987,6	3 084,2
Anzahl Pflanzen je ha	69 300	62 600	63 400
BFI	2,12	1,88	1,96

für ein einzelnes und mehrere übereinanderliegende Blätter wieder. Im sichtbaren Spektralbereich zwischen 500 und 680 nm wurde R_{∞} schon bei der Schichtdicke eines Blattes erreicht. Im Nahen Infrarot (700 - 950 nm) wurde R_{∞} bei einem BFI von 7 gemessen; eine größere Anzahl übereinandergestapelter Blätter erbrachte keine weitere Reflexionszunahme. Diese Ergebnisse weichen etwas von den Aussagen von WIEGAND et al. (1969) und RICHARDSON et al. (1969) ab. In beiden Arbeiten wird für grüne, ausdifferenzierte Blätter generell im sichtbaren Spektralbereich R_{∞} mit einem BFI von 2 und im Nahen Infrarot mit BFI = 8 angegeben. Allerdings sind die Werte 2 und 8 Maximalwerte, die auf eine Vielzahl unterschiedlicher Pflanzenarten bezogen sind und demzufolge in Abhängigkeit von den Charakteristiken der jeweils untersuchten Blätter (Dicke, Ausbildung kutikulärer Wachsauflagerungen, Mächtigkeit von Kutikula und Epidermis, anatomischer Aufbau des Blatinners, Pigmentgehalt etc.) im Einzelfall unterschritten werden können.

Die in den drei Testgebieten ermittelten Blattflächenindices und die ihnen zugrundeliegenden Bestimmungsgrößen sind in Tab. 23 zusammengestellt.

Zwischen den drei Testgebieten ergaben sich demnach nur geringfügige Unterschiede der Blattflächenindices. Sie liegen für gesunde, gut gepflegte, geschlossene Rübenbestände mit ausdifferenziertem Blattwerk um den Wert 2. Setzt man diese im Freiland ermittelte Größe in Beziehung zu den Ergebnissen der spektralphotometrischen Messungen, so kann geschlossen werden, daß sich die spektralen Reflexionseigenschaften solcher Rübenbestände im sichtbaren Bereich des Spektrums unabhängig vom Wuchsgebiet weitgehend gleichen. Im Nahen Infrarot können jedoch aufgrund von Variationen zwischen einzelnen Feldern bezüglich der Pflanzendichte oder des Wachstums- oder Entwicklungszustandes der Pflanzen und daraus resultierenden unterschiedlichen Blattflächenindices Reflexionsunterschiede auftreten, welche im IRC-Luftbild zu leichten Farbveränderungen führen. Diese sind sicherlich zu gering, um bei der visuellen Bildinterpretation Fehlansprachen zu verursachen. Dagegen ist zu erwarten, daß diese Unterschiede bei densitometrischen Farbmessungen erfaßt werden können und somit bei einer computergestützten Bildauswertung zu berücksichtigen sind.

V.3.4 Interpretation von Nematodenschäden

V.3.4.1 Visuelle Bildauswertung

Intensive Vergleichsstudien zwischen Bildinhalten und den Gegebenheiten im Gelände haben erwiesen, daß durch Zysten nematoden geschädigte Areale in Zuckerrübenbeständen bei der visuellen Interpretation von Luftaufnahmen bis $m_b = 1 : 10\,000$ mit annähernd 100 % Sicherheit als solche angesprochen werden können. Die Resultate der Bildauswertung auf einzelne Nematodenschadstellen wurden durch Feldbegehungen stichprobenartig überprüft, wobei in den einzelnen Fällen das Vorliegen von Nematodenbefall durch die Untersuchung jeweils mehrerer Rübenkörper auf Zysten verifiziert wurde. Die Ergebnisse dieser Vergleiche wurden in einer Strichliste festgehalten. Danach waren in insgesamt 352 Vergleichsuntersuchungen nur 2 Fehlinterpretationen festzustellen. Die zusammengefaßten Resultate der Bildauswertung auf Nematodenschäden, bezogen auf die einzelnen Rübenfelder sind in Tab. 24 enthalten. Daraus wird ersichtlich, daß diese Schädwirkungen im Gebiet Ameln auf fast sämtlichen erfaßten Flächen (98,9 %) auftreten. Auch bei Groß Gerau ist mit 93 % befallenen Feldern das Nematodenvorkommen sehr verbreitet. Ein geringeres Schadausmaß liegt in der Region Alzey vor, wo in knapp 60 % der Rübenschläge Nematodenschäden festzustellen waren.

Nematodenschadstellen heben sich im IRC-Luftbild durch ihre größere Helligkeit und eine andersartige Farbzusammensetzung (gelblichweiß bis blaßrot) von turgiden, nicht geschädigten Bestandteilen ab. Anhand der Kenntnis von der Verbreitung der Tiere im Bestand und von Feld zu Feld können diese Schädwirkungen von anderen Schäden, wie z.B. der Virusvergilbung, welche durch eine unregelmäßige, gelblich-weiße Sprenkelung der Bestandesoberfläche charakterisiert ist, oder von bodenstrukturbedingten Welkesymptomen unterschieden werden.

Eine wichtige Interpretationshilfe ist dabei die durch Verschleppung der Tiere bei Feldarbeiten in Reihenrichtung bewirkte Fortsetzung des Schadbildes von ursprünglichen Befallsherden aus. Die Bilder 9 - 13 geben dazu einige Beispiele.

Aus diesen Aussagen folgt jedoch nicht, daß aufgrund der hohen Treffsicherheit bei der Ansprache von Nematodenschäden auf stich-

probenartige Vergleiche im Gelände gänzlich verzichtet werden kann. Diese werden stets notwendig sein, zum einen um dem Interpreten allgemeine Informationen über das beflogene Terrain zu vermitteln und zum andern in Einzelfällen Risiken der Fehlinterpretation bei Unsicherheiten in der Entscheidungsfindung zu vermeiden. Da diese nicht wesentlich zur Erhöhung des Gesamtaufwandes beitragen (ARNETT 1976, GAUSMAN 1971, INGLE et al. 1975, YOUNG & EVANS 1972), sind bei der Planung von Befliegungen für die Praxis ökonomische Gesichtspunkte bezüglich einer Minimierung von Geländestichproben nicht gerechtfertigt.

V.3.4.2 Densitometrische Messungen

Um die im vorangegangenen Abschnitt getroffenen Aussagen zur Differenzierung nematodengeschädigter von turgiden Arealen in Zuckerrübenfeldern zu überprüfen, wurden bei mehreren Testfeldern je nach Größe 10 bzw. 12 densitometrische Einzelmessungen in geschädigten und nicht geschädigten Arealen durchgeführt (Tab. 25) und mit Hilfe des t-Tests zur Prüfung der Signifikanz der Mittelwertdifferenzen zweier verbundener Stichproben verglichen. Die Resultate der statistischen Auswertung sind in Tab. 26 enthalten, und die Bildortlagen der einzelnen Felder wurden in Abb. 23 aufgezeichnet.

In allen Fällen lagen hochsignifikante ($p = .001$) Differenzen in der Transmission bei weißem Licht vor. Dieses Teilresultat ist für die gegebene Fragestellung von besonderer Bedeutung. Es erklärt und erhärtet die Befunde der visuellen Interpretation. Rübenschläge mit Nematodenschäden sind im IRC-Luftbild von nicht geschädigten Schlägen zuverlässig zu unterscheiden.

Wenn auch keines der densitometrisch vermessenen Felder in einem Bildrandbereich lag, so ergeben doch theoretische Überlegungen unter Einbeziehung der in V.3.1.2 (Tab. 20) dargestellten Ergebnisse, daß von einem Lichtabfall geschädigte und nicht geschädigte Areale gleichermaßen betroffen sind, so daß zwar absolute Verringerungen der Helligkeitswerte vorliegen, die jedoch relativ zueinander in etwa gleichem Verhältnis stehen müssen wie im Bildmittenbereich.

In V.3.1.2 wurden unter Verknüpfung eigener Resultate mit theoretischen Grundlagen bereits einige Überlegungen zu den Zusammenhängen zwischen der spektralphotometrisch bestimmten Objektreflexion und ihrer Wiedergabe durch den IRC-Film angestellt. Werden diese

Tab. 25: Helligkeit (T_W) und Farbanteile (r,g,b) turgider, nicht geschädigter Rübenflächen und nematodengeschädigter Bestandesteile (nach densitometrischen Messungen)

Feld	T_W turgid	T_W gesch.	r turgid	r gesch.	g turgid	g gesch.	b turgid	b gesch.
I GG 76	5,80	8,28	.792	.637	.083	.152	.125	.211
III GG 76	6,90	12,30	.699	.420	.130	.299	.171	.281
I Am 76	3,39	5,93	.802	.610	.098	.205	.102	.185
III Am 76	4,08	8,44	.804	.543	.085	.229	.111	.228
I Am 77	24,1	34,2	.276	.236	.179	.227	.545	.537
II Am 77	20,2	32,5	.288	.234	.162	.228	.550	.538
III Am 77	28,6	33,6	.303	.280	.183	.210	.514	.510
IV GG 77	16,0	17,9	.116	.107	.173	.193	.711	.700
V GG 77	12,7	14,8	.096	.087	.161	.183	.743	.730

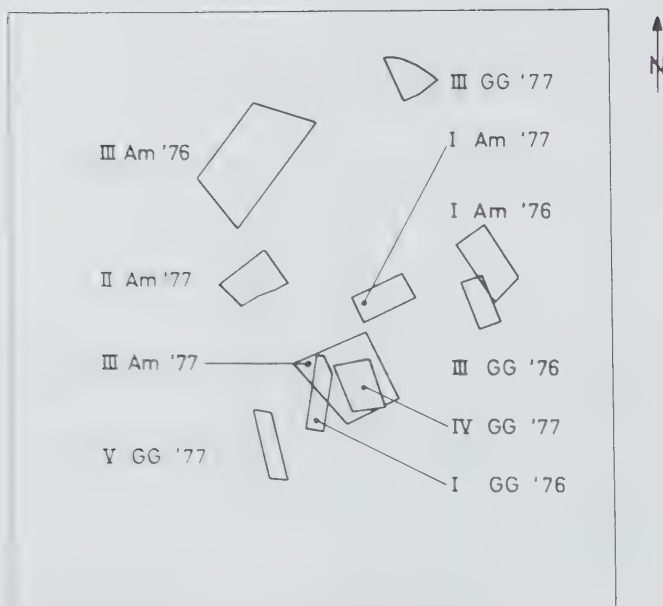


Abb. 25

Bildortlagen der densitometrisch bzw. mikrodensitometrisch vermessenen Testfelder mit Nematodenschäden in den Gebieten Ameln (Am) und Groß Gerau (GG). Einzeichnungen jeweils im $m_b = 1 : 10\ 000$

Gedankengänge nun unter Einbeziehung der in V.2.1.1 gezogenen Schlußfolgerungen zur veränderten Reflexionscharakteristik nematodengeschädigter Pflanzen und der in Tab. 18, Sp. 2-6 wiedergegebenen Reflexionsdifferenzen auf die Zusammenhänge zwischen den spektralphotometrisch gemessenen Unterschieden und etwaigen Differenzen der Farbanteilrelationen im Luftbild ausgedehnt, so sind folgende Schlüsse abzuleiten:

Tab. 24: Statistische Auswertung der densitometrischen Messungen von Nematodenschadstellen und turgiden Arealen in den in Abb. 23 dargestellten Feldern.

Trennung turgid-befallen signifikant bei $p = .001$: xxxx, signifikant bei $p = .01$: xxx, bei $p = .05$: xx, bei $p = .1$: x

Feld	T _W	T _R	T _G	T _B	rot	grün	blau
I Am 76	7.008 xxxx	1.934 x	7.284 xxxx	10.057 xxxx	8.811 xxxx	8.433 xxxx	8.300 xxxx
III Am 76	12.470 xxxx	2.186 xx	8.924 xxxx	11.221 xxxx	10.297 xxxx	9.177 xxxx	11.952 xxxx
I GG 76	6.553 xxxx	.127	7.843 xxxx	8.028 xxxx	9.278 xxxx	8.927 xxxx	9.357 xxxx
III GG 76	6.789 xxxx	2.803 xx	7.249 xxxx	6.763 xxxx	15.697 xxxx	16.288 xxxx	14.867 xxxx
I Am 77	26.649 xxxx	7.530 xxxx	19.014 xxxx	27.482 xxxx	11.810 xxxx	15.692 xxxx	3.440 xxx
II Am 76	7.319 xxxx	4.940 xxxx	5.711 xxxx	7.185 xxxx	5.329 xxxx	5.934 xxxx	4.124 xxx
III Am 77	6.586 xxxx	1.039	6.245 xxxx	4.679 xxx	5.740 xxxx	6.898 xxxx	1.460
IV GG 76	6.013 xxxx	.347	4.493 xxx	2.531 xx	1.041	3.245 xx	4.550 xxx
V GG 77	6.287 xxxx	.286	7.235 xxxx	10.581 xxxx	3.129 xxx	5.423 xxxx	2.052 x

- (1) im Bereich 700 - 950 nm sind sowohl Blattstiele als auch Boden im Vergleich zu turgiden Blättern durch geringere Reflexionsintensität gekennzeichnet, also müßte im IRC-Bild der Farbanteil "rot" bei geschädigten Arealen geringer sein als bei nicht geschädigten Bestandesteilen;
- (2) im roten Spektralbereich (600 - 680 nm) ist die Reflexion von Blattstielen und Boden gegenüber turgiden Blättern wesentlich höher, woraus zu schließen ist, daß geschädigte Flächenteile einen vergleichsweise größeren Farbanteil "grün" aufweisen;
- (3) zwischen 520 und 580 nm besitzen Blattstiele eine relativ höhere, Boden eine relativ geringere Reflexionsintensität als Blätter was einen leicht erhöhten Farbanteil "blau" in Nematodenschadstellen bewirken müßte.

In Tab. 25 wurden die errechneten Farbanteile geschädigter und nicht geschädigter Areale der jeweiligen Felder zusammengestellt. Die an dem Bildmaterial des Jahres 1976 gemessenen Werte bestätigen demnach sämtlich die aus den spektralphotometrischen Messungen abgeleiteten Erwartungen: nematodengeschädigte, nicht turgide Bestandesteile wiesen im Vergleich zu nicht geschädigten, turgiden Flächen geringere Farbwerte für "rot" und höhere für "grün" und "blau" aus. Auch die Luftbilder aus dem Jahre 1977 erfüllten bezüglich der roten und grünen Farbanteile die Erwartungen, wenngleich auch hier die Unterschiede nicht so deutlich ausgeprägt waren wie bei den Aufnahmen des Vorjahres. Die blauen Farbwerte entsprachen dagegen nicht den Forderungen, was teils mit unausgeglichene Entwicklungsverhältnissen, teils mit dunstbedingten Streulichteinflüssen erklärt werden kann.

Insgesamt wird durch diese Resultate abermals (s.a. V.3.1.2) bestätigt, daß spektralphotometrische Messungen von Oberflächenreflexionen brauchbare Rückschlüsse auf die Farbzusammensetzung von Objekten bei ihrer Abbildung auf IRC-Luftaufnahmen zulassen.

V.3.4.3 Mikrodensitometrische Messungen

Durch die Messung des Verlaufes der optischen Dichte von Bildinhalten und ihrer analogen Aufzeichnung sollte untersucht werden, ob und inwieweit Korrelationen zwischen dem aus Bodenuntersuchungen ermittelten Nematodenbesatz bzw. den durch die Proberodungen festgestellten Ertragsniveaus und dem Bildinhalt bestehen. Zu diesem Zweck wurden einige der Untersuchungspartzellen in die zugehörigen Luftbilder eingemessen und ihr Verlauf (s. Abb. 6) mit dem Mikrodensitometer dergestalt abgetastet, daß die Begrenzung des Meßstrahlenbündels (1) genau mit der Partzellenbreite im Bild übereinstimmte und (2) je Subpartzelle 4 Meßschritte durchgeführt werden; d.h. die Abtastfläche entsprach einer Fläche von $5 \times 0,5$ m in der Natur.

In den Abb. 24, 26 und 28 sind die Resultate wiedergegeben; zum direkten Vergleich wurde der in den jeweiligen Subpartzellen bestimmte Rübenertrag mit eingezeichnet. Zur besseren Anschaulichkeit wurden fotografische Ausschnitte aus den jeweiligen Luftaufnahmen hergestellt, wobei Bild 8 und 9 der Abb. 24, Bild 13 der Abb. 26 und Bild 12 der Abb. 28 zuzuordnen sind.

Die Abb. 25 und 27 geben die aus Bodenproben ermittelten Nematodenpopulationen wieder, wobei im Vergleich theoretisch zu fordern ist, daß sich diese umgekehrt zu den Ertragswerten und den optischen Dichten verhalten.

Die Mikrodensogramme belegen nachdrücklich die Aussagekraft des Luftbildes in bezug auf die Erfassung von Pflanzenschädigungen und Ertragseinbußen sowie die Auswirkungen phytosanitärer Maßnahmen (Abb. 26/Bild 13 und Abb. 28/Bild 12).

Während die Untersuchungen von HAEFNER (1971), HAEFNER & GFELLER (1972) sowie HAEFNER & MAURER (1973) noch nicht auf eine sichere Korrelierbarkeit zwischen mikrodensitometrisch gemessenen Bildaten und der Wirkung von Herbiziden in einem Getreide-Partzellenversuch schließen lassen konnten, berichten MANZER & COOPER (1965 und 1967), JACKSON et al. (1971), WALLEN et al. (1975 und 1976) sowie JACKSON & WALLEN (1976) über gesicherte Zusammenhänge zwischen dem Befall von Kartoffeln mit *Phytophthora infestans*, Fungizid-Versuchsanlagen und dem Verlauf der optischen Dichte; ebenso WALLEN & PHILPOTTS (1971), WALLEN & JACKSON (1971), WALLEN

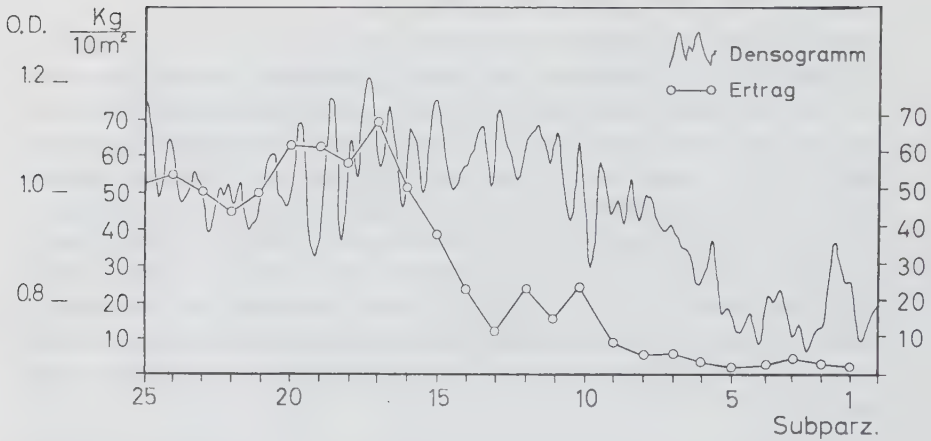


Abb. 24

Densogramm und Ertragskurve von Testfeld III Groß Gerau 1976
(zum Vergleich mit Abb. 25)

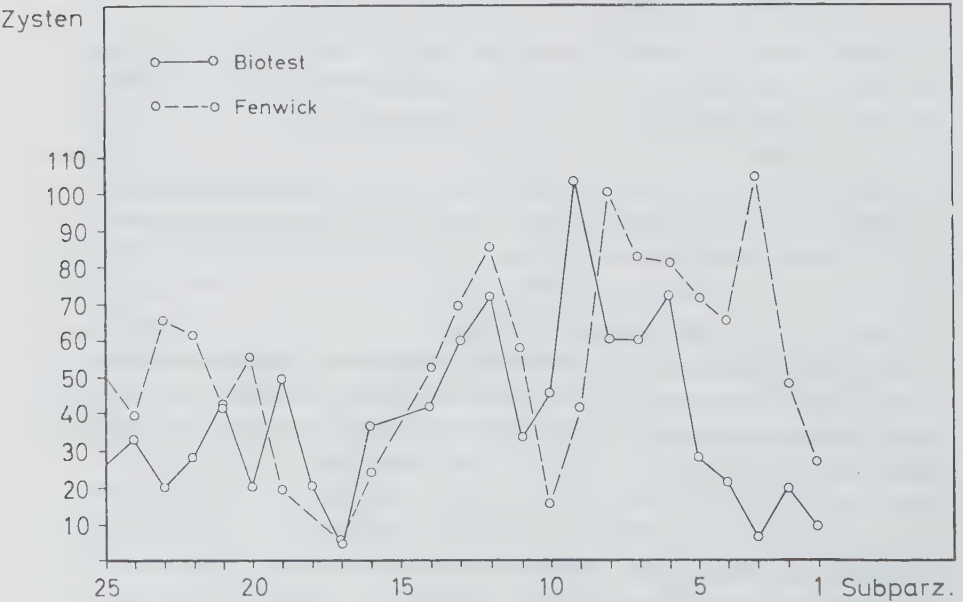


Abb. 25

Resultate der Bodenuntersuchungen auf Nematodenbesatz aus Testfeld
III Groß Gerau 1976 (zum Vergleich mit Abb. 24)

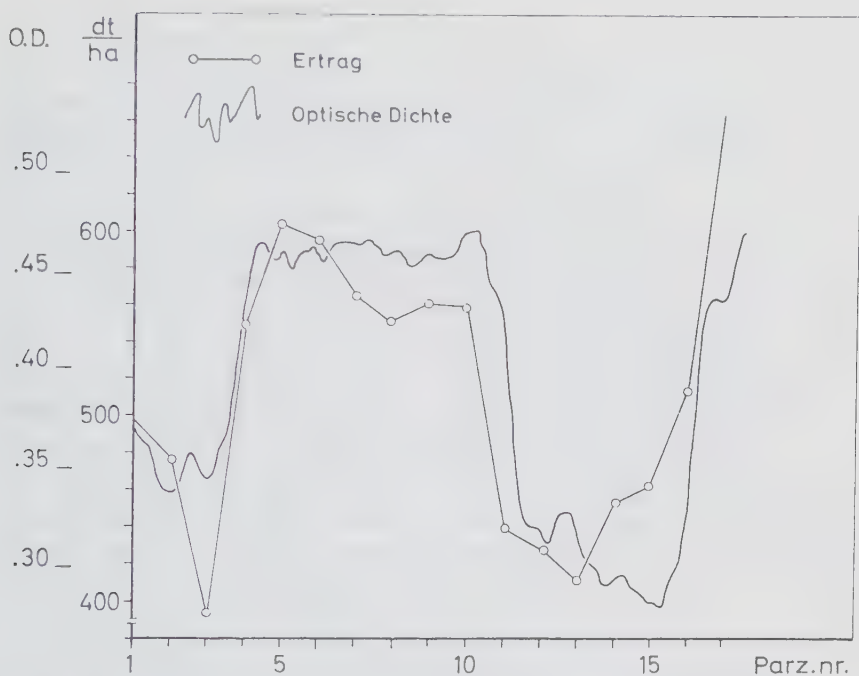


Abb. 26

Mikrodensogramm und Rübenenertrag im Verlaufe der Untersuchungsparzelle von Testfeld I /Ameln 1977 (zum Vergleich mit Abb. 27)

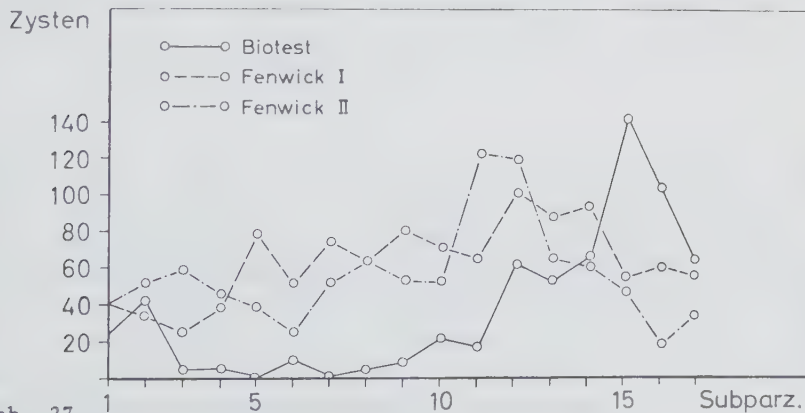


Abb. 27

Resultate der Bodenuntersuchungen auf Nematoden im Verlaufe der Untersuchungsparzelle von Testfeld I /Ameln 1977 (zum Vergleich mit Abb. 26)

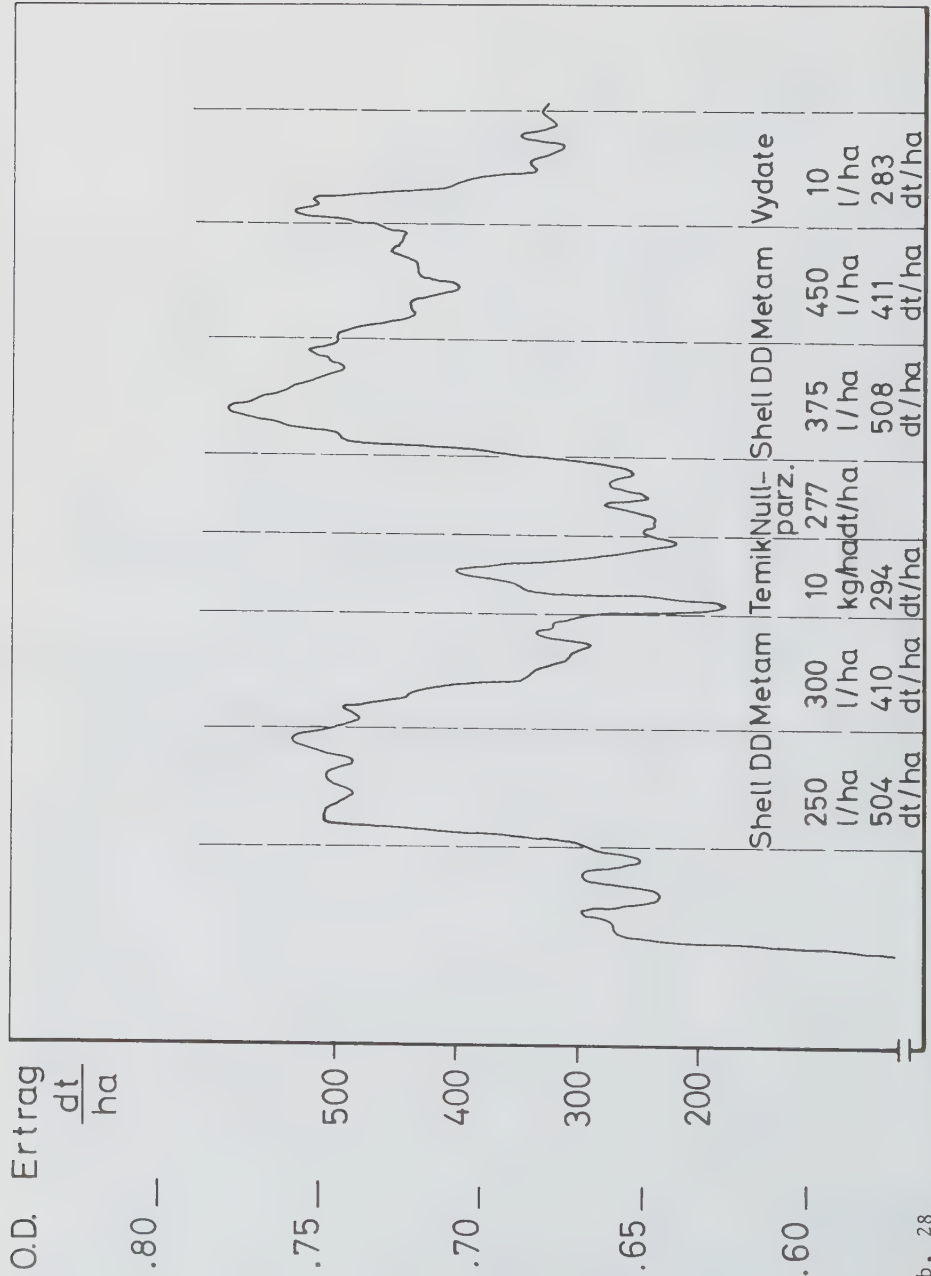


Abb. 28

Densogramm des Nematodenentseuchungsversuches Wolfskehlen (zum Vergleich mit Bild 12)

(1975) und JACKSON & WALLEN (1975) bezüglich der Blattfleckenkrankheit der Bohne, und MEYER & CALPOUZOS (1968) vermochten die Wirkung verschiedener Fungizidbehandlungen gegen die Blattfleckenkrankheit der Zuckerrübe mit Farbabstufungen im Luftbild zu korrelieren.

Allerdings erlauben die dargestellten Resultate nicht die Schlußfolgerung, daß absolute, allgemeingültige Maße zur exakten Bestimmung von Zuckerrübenenerträgen bzw. nematodenbedingten Ertragsverlusten gefunden werden können. Die Zuordnung optischer Dichtewerte zu Erntemengen ist aufgrund der Charakteristiken von Bildentstehung und Bildinhalt nur auf relativer Basis möglich, d.h. durch Korrelationen von Geländestichproben mit den zugehörigen Bildinhalten.

Die Densogramme führen jedoch in ihrer jeweiligen Relativierung zu der Aussage, daß sich Nematodenschäden in Zuckerrübenkulturen im Luftbild manifestieren und ihre Auswirkungen auf den künftigen Ertrag im Einzelfall quantifizierbar sind.

V.3.4.4 Dichteebenentrennung und Farbcodierung am elektronischen Bildanalysator

Mit Hilfe des VP-8 Image Analyzers kann der Dichteumfang einer Bildvorlage in bis zu 8 Klassen aufgetrennt werden. Jeder dieser Klassen kann anschließend eine bestimmte Farbe zugeordnet werden. Auf diese Weise ist es u.a. möglich, Bildinhalte zu verdeutlichen, die aufgrund ihres geringen Dichteunterschiedes durch das menschliche Auge nur schwer zu differenzieren sind.

Im Rahmen der gegebenen Aufgabenstellung wurde das Gerät dazu verwendet, um eine Klassifizierung von Nematodenschäden in auf Luftaufnahmen abgebildeten Zuckerrübenfeldern nach Schadstufen durchzuführen. Nach den in V.2.1.2 getroffenen Aussagen ändern sich die spektralen Reflexionseigenschaften der Zuckerrübenpflanzen mit zunehmendem Schadausmaß. Parallel dazu ändert sich auch ihre Abbildung im Luftbild, wie im vorhergehenden Abschnitt anhand von kontinuierlichen Dichtemessungen belegt werden konnte. Demzufolge sind im Einzelfall Schadstufenklassifizierungen durch Dichteebenentrennung und Farbcodierung möglich.

Mit den Arbeiten am Image Analyzer sollten keine wissenschaftlichen Beweise o.ä. erbracht werden; dafür ist das Gerät auch zu leicht manipulierbar. Es wurden damit lediglich didaktische Zwecke verfolgt mit der Zielsetzung, erarbeitete Resultate zu verdeutlichen (s. Bild 9). Tatsächlich erwiesen sich - als Farbdiaspositive oder Farbbilder vorgeführt - Farbcodierungen einzelner Rübenschläge oder Befallsstellen bei der Vermittlung der Möglichkeiten des Luftbildeinsatzes zur Nematodenschadensinventarisierung an potentielle Nutzer als sehr brauchbar.

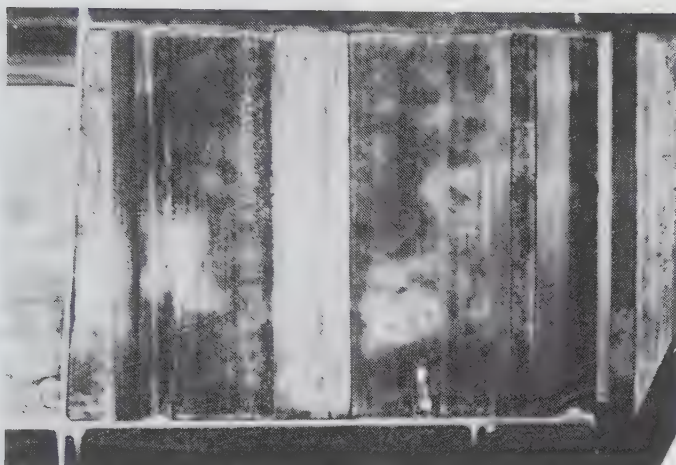


Bild 8 Testfeld III Groß Gerau 1976: Versandung kombiniert mit starkem Nematodenbefall. Fortsetzung des Befalls in Bearbeitungsrichtung.
(Zum Vergleich mit Abb. 23 und 24)



Bild 9 Relative Schadstufenklassifizierung mit Hilfe des elektronischen Bildanalysators VP-8.
Grün = turgide Bestandesteile; Reihenfolge zunehmender Schädigung: violett - hellblau - dunkelblau - schwarz



Bild 10 Unterscheidungsmöglichkeiten zwischen Auswirkungen wechselnder Bodenstruktur (quer verlaufend) und Nematodenschäden (in Reihenrichtung fortgesetzt). Groß Gerau 1977; Freig.Nr. 18 H 214 Regierungspräsidium Köln

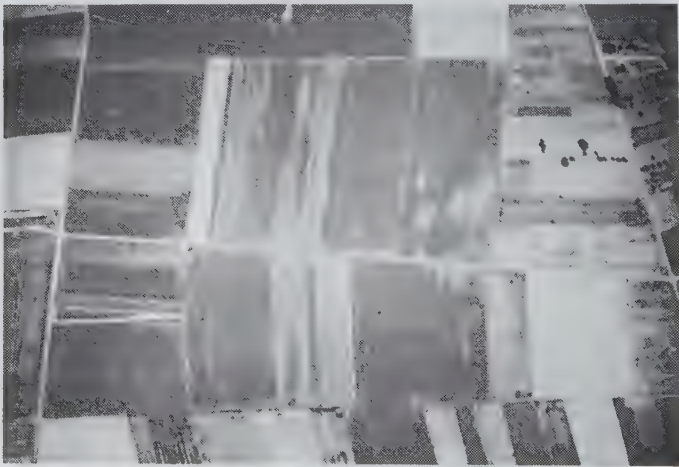


Bild 11 Ausbreitung der Nematodenschäden von Feld zu Feld. Ameln 1977; Freig.Nr. 18 H 212 Regierungspräsidium Köln



Bild 12

Testfeld III Groß Gerau 1977:
Bodenentseuchungsversuch (zum
Vergleich mit Abb. 27). Die
Grenzen zwischen den einzelnen
Behandlungen werden durch die
freigelegten Proberodungsflächen
angedeutet. Freig.Nr. 18 H 214
Regierungspräsidium Köln

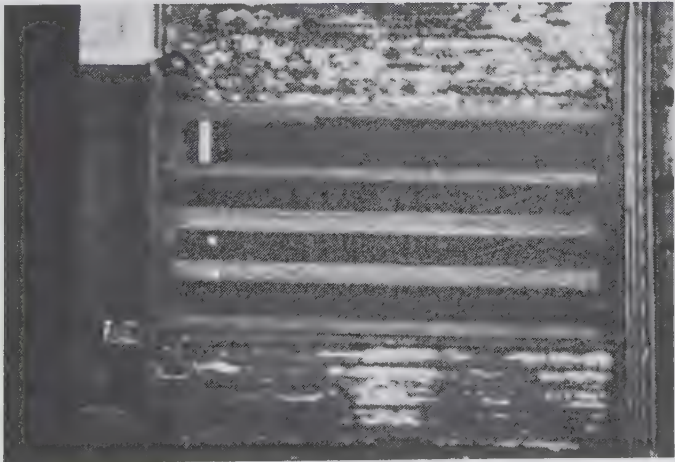


Bild 13 Testfeld I Ameln 1977: Bodenentseuchungsversuch mit
Shell DD.
Behandelte Parzellen: dunkelrot; unbehandelte, schwer
geschädigte Parzellen: gelblich (zum Vergleich mit Abb.
25 u. 26) Freigabenr. 18 H 212 Regierungspräsidium Köln

VII ZUSAMMENFASSUNG

Die Verbreitung des Rübenzystennematoden *Heterodera schachtii* Schmidt in bedeutenden Zuckerrübenanbaugebieten der Bundesrepublik Deutschland hat während der letzten Jahre in erheblichem Umfang zugenommen. Seit mit der Entwicklung geeigneter Applikationsgeräte chemische Bekämpfungsmaßnahmen im Einzelfall auch aus wirtschaftlicher Sicht wirkungsvoll und brauchbar erscheinen, ist die Inventarisierung des Nematodenauftretens von vorrangiger Bedeutung. Die konventionelle Bestimmung der Populationsdichte dieser Tiere durch die Untersuchung von Bodenproben ist bei vertretbarem Aufwand von begrenzter Aussagegenauigkeit und läßt keine Rückschlüsse auf das Verteilungsmuster der Nematoden im Bestand zu. Mit der vorliegenden Arbeit sollte geklärt werden, ob Nematodenschäden in Zuckerrübenbeständen durch die Interpretation von Infrarot-Farbluftaufnahmen präzise und kostengünstig erfaßt werden können.

Für die Untersuchungen wurden drei Zuckerrübenanbauregionen als Testgebiete ausgewählt. Diese lagen (a) in der Umgebung von Ameln nordwestlich von Köln, (b) südlich von Groß Gerau in der Rheinebene und (c) in der Nähe von Alzey/Rheinhessen. Dort wurden in den Jahren 1976 und 1977 Luftaufnahmen fotografiert und Bodenprobenahmen, Ertragsbestimmungen und Kartierungen durchgeführt. Arbeiten im Labor umfaßten spektralphotometrische Reflexionsmessungen sowie densitometrische Messungen am Bildmaterial.

Die Untersuchung der Bodenproben auf Wasser- und Nährstoffgehalte, den Säuregrad, sowie Nematodenbesatz (nach Fenwick und Biotest) erbrachten folgende Resultate:

- es bestehen keine Zusammenhänge zwischen der Ausbildung von Nematodenbefallssymptomen und dem Gehalt des Bodens an Feuchtigkeit und Nährstoffen
- die aus Bodenproben ermittelten Nematodenpopulationen sind nicht immer proportional zu den Ertragsverlusten.

Außerdem geben die Untersuchungen von Mischproben von Feldflächen keine Anhaltspunkte zur Befallsverteilung der Nematoden.

Die spektralphotometrischen Reflexionsmessungen an Blättern geschädigter und nicht geschädigter Zuckerrübenpflanzen im Spektral-

bereich 500 bis 950 Nanometer ergaben weder im sichtbaren Bereich noch im Nahen Infrarot signifikante Differenzen, obwohl aus anatomisch-mikroskopischen Untersuchungen von Blattquerschnitten auf die Möglichkeit gradueller Reflexionsunterschiede im Infrarot geschlossen werden kann. Vergilbungsvirus-befallene Blätter weichen dagegen insbesondere im sichtbaren Bereich erheblich von gesunden Blättern ab.

Bei der visuellen Auswertung der in den Bildmaßstäben 1 : 5 000, 1 : 7 500 und 1 : 10 000 und mit Längsüberdeckungen von 80 %, 60 % und 20 % aufgenommenen Luftbilder wurde zunächst ein Interpretationsschlüssel für die Klassifizierung von Zuckerrübenfeldern entwickelt. Vergleichende Überprüfungen der erhaltenen Auswertungsergebnisse mit Kartierungen sowie durch Geländebegehungen erbrachten eine Klassifikationsgenauigkeit von 98%.

Durch Zystennematoden geschädigter Bestandesteile können bei der Interpretation der Aufnahmen bis $m_b = 1 : 10\,000$ eindeutig von voll produktiven Arealen unterschieden werden. Die Ursache dafür liegt in der unterschiedlichen Reflexionsgeometrie des Blätterdaches: während das turgide Blattwerk nicht geschädigter Pflanzen die einfallende Sonnenstrahlung weitgehend diffus reflektiert und teilweise in Schattenräumen absorbiert, wird von nicht-turgiden Blättern stark nematodenbefallener Pflanzen ein relativ großer Teil des Sonnenlichtes gerichtet reflektiert. Zudem trägt ein verhältnismäßig großer Anteil an exponierten Blattstielflächen, welche im sichtbaren Spektralbereich eine im Vergleich zur Blattfläche wesentlich höhere Reflexionsintensität aufweisen, zusammen mit verringerten Schattenräumen und exponierten Bodenoberflächenanteilen zur Veränderung der Reflexionseigenschaften dieser Areale bei. Anhand des typischen Ausbreitungsmodus der Nematoden im Feld können Verwechslungen mit anderen Schadwirkungen weitgehend ausgeschlossen werden. Vergleiche zwischen den Resultaten der Bildinterpretation und den Gegebenheiten im Bestand ergaben in den beflogenen Arealen eine Fehlerrate von $\leq 2\%$. Auch Virusvergilbung kann aufgrund des Musters, das die befallenen Pflanzen oder Pflanzengruppen in den Feldern bilden, klar differenziert werden.

Densitometrische Messungen an aufeinanderfolgenden Aufnahmen ergaben, daß die Bildortlage ohne Einfluß auf die visuelle Klassifizierbarkeit der Kulturflächen und die Ansprache von Nematodenschäden ist. Bei weißem Licht wurden hochsignifikante ($p = 0.001$) Dichte-

unterschiede zwischen geschädigten und nicht geschädigten Bestandesteilen festgestellt.

Analoge Aufzeichnungen mikrodensitometrischer Abtastungen von Untersuchungspartzen sowie von Nematodenbekämpfungsversuchen auf chemischer Basis wiesen deutliche positive Korrelationen zwischen den einzelnen Ertragsniveaus und der optischen Dichte auf (Abb. 23, 25 und 27). Damit konnte die hohe Aussagekraft des Luftbildes auf ausdrucksvolle Weise belegt werden.

Durch Dichteebenenentrennung und anschließende Farbcodierung von Feldern oder Befallsstellen auf analoger Basis am elektronischen Bildanalysator können im Einzelfall Schadstufenklassifizierungen durchgeführt und bildhaft festgehalten werden. Darstellungen dieser Art eignen sich insbesondere für didaktische Zwecke bei der Vermittlung von Resultaten an die Nutzer.

Für die Praxis der Überwachung von Rübenanbaugebieten und der Inventarisierung von Nematodenschäden können Infrarot-Farbluftbilder mit Erfolg eingesetzt werden, um Ausmaß und geometrische Verteilung von Nematodenschadstellen in Zuckerrübenbeständen zu erkennen, zu quantifizieren und bildhaft festzuhalten. Die geeignete Auswertung von Luftaufnahmen ermöglicht einerseits synoptische Überblicke für ganze Anbauggebiete und erbringt andererseits detaillierte Informationen über das Schadbild in den einzelnen Feldern. Es wird dadurch möglich, gezielte, ggf. auch abgestufte Bekämpfungsmaßnahmen einzuleiten. Dabei ist der Einsatz von Luftbildern für diese Zwecke sehr kostengünstig. Nach dem Preis- und Kostengefüge von 1978/79 ist mit Gesamtkosten von unter DM 10.- je ha zu rechnen (s. Anhang II).

Ein Bildmaßstab von 1 : 10 000 ist als optimal zu bezeichnen; bei ebenem Gelände reicht eine Bildüberdeckung von 20 % längs und 30 % quer aus. Als bestgeeigneter Bildflugtermin hat sich - vollständiger Reihenschluß vorausgesetzt - der Zeitraum um die Wintergerstenernte erwiesen. Aufgrund des großen Interesses, das dem Verfahren von Seiten der potentiellen Nutzer entgegengebracht wird, steht seine Übernahme in die Praxis inzwischen schon unmittelbar bevor. Ein Ablaufdiagramm zur praktischen Anwendung ist in Abb. 28 wiedergegeben.

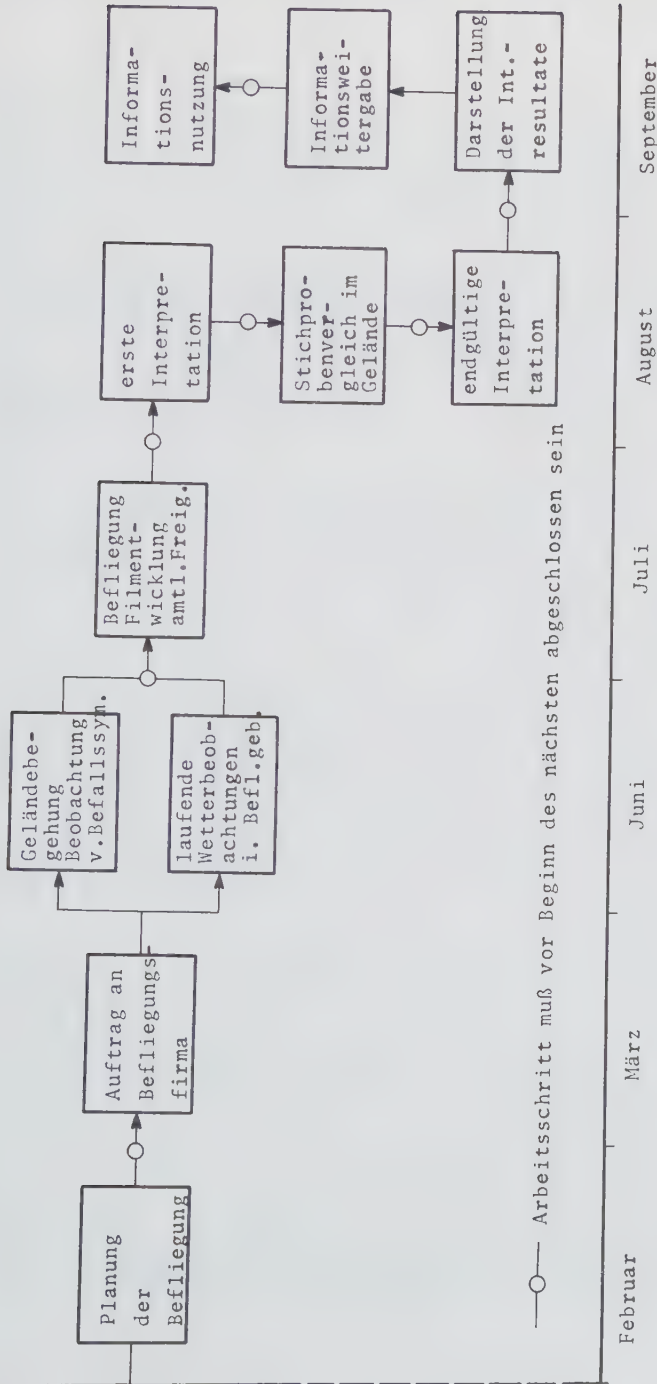


Abb. 29

Ablaufdiagramm zur Inventarisierung von Nematodenschäden in Zuckerrübenfeldern mit Hilfe der Luftbildfotografie

LITERATUR

- ABOUL-EID, H.Z., M.M. KHODAIR, A.G. ABDEL-SAMIE, M.A. ABDEL-HADY,
1974: Spectral reflectance and photographic studies on some
healthy and nematode-infested cotton and corn plants in Egypt.-
40 th Ann. Meet. ASP (abstr.)
- AKCA, A., 1970: Eine Untersuchung zur Unterscheidung und Identifi-
zierung einiger Objekte auf Schwarz-Weiss-Luftbildern durch
quatitative Beschreibung der photographischen Textur.- Diss.
Univ. Freiburg, 146 pp.
- AL-ABBAS, A.H., R. BARR, J.D. HALL, F.L. CRANE, M.F. BAUMGARDNER,
1972: Spectra of normal and nutrient-deficient maize leaves.-
Agron. J. 66, 16-20
- ALBERTZ, J., 1970: Sehen und Wahrnehmen bei der Luftbildinterpre-
tation.- Bildmessung und Luftbildwesen 38 (1), 25-34
- ALDRICH, R.C., 1971: Space photos for land use and forestry.-
Photogramm. Engn. 37, 389-401
- ALLEN, L.H., K.W. BROWN, 1965: Shortwave radiation in a corn crop.-
Agron. J. 57, 575-580
- ALLEN, W.A., A.J. RICHARDSON, 1968: Interaction of light with a
plant canopy.- Proc. 5th Symp. Rem. Sens. Environ., 219-232
- ALLEN, W.A., H.W. GAUSMAN, A.J. RICHARDSON, J.R. THOMAS, 1969:
Interaction of isotopic light with a compact plant leaf.- J.
Opt. Soc. Am. 59 (10), 1376-1379
- American Society of Photogrammetry, 1960: Manual of Photographic
Interpretation.- Publ. by Am. Soc. Photogramm., Washington D.C.,
868 pp.
- American Society of Photogrammetry, 1966: Manual of Photogrammetry.-
3. Aufl., 2 Bde, 1199 pp.
- American Society of Photogrammetry, 1968: Manual of Colour Aerial
Photography, 548 pp.
- American Society of Photogrammetry, 1975: Manual of Remote Sensing.
2 Bde, 2144 pp.
- ANDERSON, J.R., 1971: Land-use classification schemes.- Photogramm.
Engn. 37, 379-388
- ANONYM, 1887: Verwendung der Ballonphotographie zu forstwirtschaft-
lichen Zwecken.- Z. f. Luftschiffahrt u. Physik d. Atmosphäre,
285-286, sowie Berliner Tageblatt v. 10. 9. '87

- ANSON, A., 1966: Color photo comparison.- Photogramm. Engn. 32, 286-297
- ANSON, A., 1970: Color aerial photos in the reconnaissance of soils and rocks.- Photogramm. Engn. 36 (4), 343-353
- ARNETT, J.D. jr., 1975: Aerial search for pests.- Soybean Digest July, 20
- ARNETT, J.D. jr., 1976: Use of aerial photography in soybean cyst nematode surveys.- Plant Disease Reporter 60 (1), 3-4
- BABEL, A., 1935: Infrarot-Photographie im Pflanzenschutz.- Angew. Bot. 17, 43-53
- BAGLEY, J.W., 1941: Aerophotography and Aerosurveying.- Mc Graw Hill Comp., 287 pp.
- BASU, P.K., H.R. JACKSON, V.R. WALLEN, 1978: Estimation of pea yield loss from severe root rot and drought stress using aerial photographs and a loss conversion factor.- Ca. J. Plant Sci. 58, 159-164
- BATSON, F.T., J.C. ELLIOTT, 1975: Surface resource inventory of Eastern Montana rangelands utilizing high altitude color infrared aerial photography.- 5th Workshop on Colour Aerial Photography, Sioux Falls, SD, 117-128
- BAUER, M.E., P.H. SWAIN, R.P. MROCZYNSKI, P.E. ANUTA, R.B. McDONALD, 1971: Detection of southern corn leaf blight by remote sensing techniques.- Proc. 7th Symp. Rem. Sens. Env., 693-704
- BAWDEN, F.C., 1933: Infrared photography and plant virus diseases.- Nature 132, 168
- BEARD, J.S., 1941: Land utilization survey of Trinidad.- The Caribbean Forester 2 (7), 237-261
- BEHRINGER, P., 1967: Der Biotest - Nematodennachweis mit Zukunft.- Kartoffelbau 18, 170-172
- BEHRINGER, P., 1976: Möglichkeiten der Erfassung und Bekämpfung des Rüben nematoden.- Zucker 29 (12), 679-684
- BEHRINGER, P., 1977: Die Gefährdung des Rübenbaus durch den Rüben nematoden (*Heterodera schachtii*).- Gesunde Pflanzen 8, 3 pp.
- BEHRINGER, P., 1978: Nematodenkontrollierter Rübenanbau.- Deutsche Zuckerrübenzeitung 15 (1), 4-5
- BENNET, H.E., J.O. PORTEUS, 1969: Relation between surface roughness und specular reflectance at normal incidence.- J. Opt. Soc. Am. 51, 123-127

- BIGELOW, G.F., 1966: Human factors and problems in the development and use of image interpretation keys.- Army Project No. 2J 620901 A721, U.S. Army Personnel Res. Office
- BIRD, A.F., 1960: Additional notes on the attractiveness of roots to plant parasitic nematodes.- *Nematologica* 5 (3), 217
- BOEHNEL, H.-J., 1977a: What do we call a spectral signature?- Meet. ISP WG VII-9, Freiburg, June 14-16 (unveröff.)
- BOEHNEL, H.-J., 1977b: Bestimmung spektraler Signaturen bewachsener Oberflächen durch radiometrische Bodenmessungen (Realisierung und Probleme).- Ber. z. Symp. FMP, Hannover, 417-426
- BOESCH, H., D. BRUNNSCHWEILER, 1960: Seasonal changes of the agricultural landscape interpreted from aerial photographs.- *Geographica Helvetica* 15 (4), 257-261
- BÖTGER, H., 1977: Voraussetzungen für die Erkennung von Rübennekrotiden.- *Die Zuckerrübe* 26 (6), 20-21
- BOURNE, R., 1937: Air photos of rural areas.- J. Min. Agric., Great Britain XLIII (10)
- BRACH, E.J., 1974: Development of techniques and equipment to measure optical characteristics of agricultural plants and products.- Agric. Canada Eng. Res. Serv. Rep. No. 6842-1
- BRACH, E.J., R.W. TINKER, G.T. STAMOUR, 1977: Improvements in spectral reflectance measurements of field crops.- Can. Agric. Engn. 19 (2), 78-83
- BRANSCHIED, W., 1977: Untersuchungen an der Hufrolle bei Pferden mit und ohne Hufrollenerkrankungen (Podotrochlose).- Diss. Univ. Hohenheim, 184 pp.
- BRENCHLEY, G.H., 1966: The aerial photography of potato blight epidemics.- J. of the Royal Aeronautical Soc., 70, 1 082-1 086
- BRENCHLEY, G.H., 1968: Aerial photography in agriculture.- Outlook on Agriculture 5, 258-265
- BRENCHLEY, G.H., C.V. DADD, 1962: Potato blight recording by aerial photography.- N.A.A.S. Quart. Rev. London, 57, 21-25
- BROMBERGER, E.H., H.W. DILL jr., 1960: Photo interpretation in agriculture.- In: Manual of Photographic Interpretation, Publ.: Am. Soc. Photogramm., 561-666
- BROWN, H.T., F. ESCOMBE, 1905: Researches on some of the physiological processes of green leaves with special reference to the interchange of energy between the leaf and its surroundings.- Proc. Roy. Soc. London 76, 29-111

- BROWN, H.T., W.E. WILSON, 1905: On the thermal emissivity of a green leaf in still and moving air.- Proc. Roy. Soc. London 76, 122-175
- BRUCHHAUSER, U., 1979: Dipl-Hausarbeit Univ. Freiburg (in Vorbereitung)
- BRUNNSCHWEILER, D.H., 1957: Seasonal changes of the agricultural pattern - a study in comparative airphoto interpretation.- Photogramm. Engn. 23, 131-139
- BURINGH, P., 1954: The analysis and interpretation of aerial photographs in soil survey and land classification.- Neth. J. Agric. Sc., 16-26
- BURINGH, P., 1955: Some problems concerning aerial photo interpretation in soil survey.- Neth. J. Agric. Sc., 100-105
- BUSHNELL, F.A., 1932: A new technique in soil mapping.- Am. Soil Science Soc., Bull. XIII
- CAGIRICI, M., 1978: Untersuchungen zur Frage der Erkennung, Klassifizierung und Inventarisierung von kranken und abgestorbenen Kiefern in Infrarot-Luftbildern.- Diss. Univ. Freiburg, 187 pp.
- CARDENAS, R., H.W. GAUSMAN, W.A. ALLEN, M.L. SCHUPP, 1970: The influence of ammonia-induced cellular discoloration within cotton leaves (*Gossypium hirsutum* L.) on light reflectance, transmittance and absorptance.- Rem. Sens. Environm. 1, 199-202
- CARDENAS, R., A. PEYNADO, H.W. GAUSMAN, A.H. GERBERMANN, R.L. BOWEN, 1971: Photographic sensing of boron and chloride toxicities of citrus trees.- J. Rio Grande Valley Hort. Soc. 25, 36-45
- CARDENAS, R., H.W. GAUSMAN, C.E. THOMAS, 1972: Photographic pre-visual detection of watermelon mosaic virus in cucumber.- J. Rio Grande Valley Hort. Soc. 26, 73-75
- CARNEIRO, C.M., 1978: Forest cover mapping from Landsat-MSS data by analog and computer assisted techniques in the Federal Republic of Germany - a feasibility study.- Diss. Univ. Freiburg, 180 pp.
- CHIANG, H.C., R. LATHAM, M.P. MEYER, 1973: Aerial photography: use in detecting simulated insect defoliation in corn.- J. Econ. Entomology 66 (3), 779-784
- CHURCHILL, E.D., R.L. STITT, 1955: Association analysis applied to the interpretation of aerial photographs.- Photogramm. Engn. 21, 598-602

- CIHLAR, J. R. PROTZ, 1972: Color-film densities for soils.- Photogramm. Engn. 21, 598-602
- CIOLKESZ, A., 1974: Analyse der Anbaustruktur an Hand von Luftbildern.- Proc. XIIth Int. Congr. ISP, Ottawa, Kanada, 417 (Abstr.)
- COBLENTZ, W.W., 1912: The diffuse reflecting power of various substances.- Bull. Bur. Standards 9, 283-325
- COLWELL, R.N., 1956: Determining the prevalence of certain cereal crop diseases by means of aerial photography.- Hilgardia 26 (5), 223-286
- COLWELL, R.N., 1960: Some uses and limitations of aerial colour photography in agriculture.- Photogramm. Engn. 26, 220-222
- COLWELL, R.N. (Hrsg.), 1970 a: Remote Sensing - With Special Reference to Agriculture and Forestry.- Nat. Acad. Sc., Washington D.C., 424 pp.
- COLWELL, R.N., 1970 b: Applications of remote sensing in agriculture and forestry.- In: Remote Sensing, Nation. Acad. Sci. Washington D.C., 164-223
- COLWELL, R.N., 1972: Space photography aids agricultural planning.- Calif. Agric., 8-13
- COLWELL, J.E., 1974: Vegetation canopy reflectance.- Rem. Sens. Environm. 3, 175-183
- CONDIT, H.R., 1970: The spectral reflectance of American soils.- Photogramm. Engn. 36 (9), 955-966
- COOPER, G.R., F.E. MANZER, 1964: Further development of aerial photographic techniques for potato late blight detection.- Phytopathology 54, 127 (Abstr.)
- CORTEN, F.L., 1966: Physik des Luftbildes in "richtigen" und "falschen" Farben.- Bildmessung und Luftbildwesen 34 (4), 191-201
- DAKSHINAMURTI, C., B. KRISHNAMURTY, A.S. SUMMANWAR, P. SHANTA, P.R. PISHAROTY, 1971: Remote Sensing of coconut wilt.- Proc. 7th Symp. Rem. Sens. Environ., 25-29
- DECKER, H., 1969: Phytonematologie.- VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin, 526 pp.
- DIRMHIRN, J., 1964: Das Strahlungsfeld im Lebensraum.- Akad. Verl. Ges., Frankfurt/Main, 414 pp.
- MCDOWELL, D.Q., M.R. SPECHT, 1974: Determination of spectral reflectance using aerial photographs.- Photogramm. Engn. 40, 559-568
- EARDLEY, A.J., 1941: Aerial Photographs: Their Use and Interpretation.- Harper & Bros., 203 pp.

- EGBERT, D.D., F.T. ULABY, 1972: Effect of angles on reflectivity.- Photogramm. Engn. 38, 556-568
- EGNER, H., H. RIEHM, V.R. DOMINGO, 1960: Publ. Kungl. Landbrukshögsk., Ann. 26, 199, in Schlichting/Blume, Bodenkundliches Praktikum, Verl. Paul Parey 1966
- EPSTEIN, A.H., 1975: Role of remote sensing in preventing plant disease and world hunger.- 5th Workshop on Colour Aerial Photography, Sioux Falls, SD, 61-65
- EVANS, R.A., J.A. YOUNG, 1973: Current approaches to rabbitbrush control with herbicides.- Down to Earth 29 (2), 1-4
- EYRE, L.A., 1971: High-altitude Color Photographs.- Photogramm. Engn. 37, 1149-1153
- FELDNER, K., 1975: Anwendungsmöglichkeiten der Luftbildinterpretation in Agrarprojekten.- entwicklung + ländlicher raum 5/75, 16-18
- FISCHER, W., 1977 a : Determination of spectral signatures from vegetated surfaces in situ.- Meet ISP WG VII-9, Freiburg, June 14-16 (unveröff.)
- FISCHER, W., 1977 b: Zur Signifikanz von spektralen Signaturen bewachsener Oberflächen im Bereich 400 - 1 100 Nanometer.- Ber. z. Symp. FMP, Hannover, 427-438
- FLYNN, F.M., R.C. HELLER, G.E. DOVERSPIKE, 1965: Microdensitometer applied to land use classification.- Photogramm. Engn. 31, 294-306
- FRAZEE, C.J., V.I. MYERS, F.C. VESTIN, 1971: Remote sensing for detection of soil limitations in agricultural areas.- Proc. 7th Int. Symp. Remote Sens. Environm., Vol. I, Univ. of Michigan, Ann Arbor, 327-343
- FRICKE, W., K. VÖLGER, 1965: Falschfarben-Photographie für die Luftbild-Interpretation.- Umschau 65 (14), 441-442
- FRINKING, H.D., 1972: Crop identification in the Netherlands by means of aerial false-color film.- Neth. J. agric. Sc. 20, 261-271
- FRITZ, N.L., 1967: Optimum methods for using infrared-sensitive color film.- Proc. 33rd Meet. ASP, 37-45
- FRYEREAR, D.W., C.L. WIEGAND, 1974: Evaluating wind erosion from aerial photos.- ASAE Trans. 17 (5), 892-894
- GARUTI, H.C., 1974: Identification and quantification of agricultural crops, determination of dynamics of land use and agricultural census. Eng. Secretaria de Agricultura y Ganaderia, Argentina

- GATES, D.M., W. TANTRAPORN, 1952: The reflectivity of deciduous trees and herbaceous plants in the infrared to 25 microns.- Science 115, 613-616
- GATES, D.M., 1965: Characteristics of soil and vegetated surfaces to reflected and emitted radiation. Proc. 3rd Symp. Rem. Sens. Environm., Univ. Michigan, Ann Arbor, 573-599
- GATES, D.M., H.J. KEEGAN, J.C. SCHLETER, V.R. WEIDNER, 1965: Spectral properties of plants.- Appl. Opt. 4, 11-20
- GATES, D.M., 1970: Physical and physiological properties of plants.- In: Remote Sensing, Publ. by Nation. Acad. Sci., Washington D.C., 224-252
- GAUSMAN, H.W., W.A. ALLEN, R. CARDENAS, 1969: Reflectance of cotton leaves and their structure.- Rem. Sens. Environm. 1, 19-22
- GAUSMAN, H.W., 1971: Photographic remote sensing of "sick" citrus trees.- Proc. Int. Workshop on Earth Resources Survey Systems, Ann Arbor, Michigan, Vol. 2, 15-30
- GAUSMAN, H.W., W.A. ALLEN, R. CARDENAS, R.L. BOWEN, 1970 a: Color photos, cotton leaves, and soil salinity.- Photogramm. Engr. 36 (5), 454-459
- GAUSMAN, H.W., W.A. ALLEN, R. CARDENAS, R.L. BOWEN, 1970 b: Detection of foot rot disease of grapefruit trees with infrared colour film.- J. Rio Grande Valley Hort. Soc. 24, 36-42
- GAUSMAN, H.W., W.A. ALLEN, V.I. MYERS, R. CARDENAS, R.W. LEAMER, 1970 c: Reflectance of single leaves and field plots of cycocel-treated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in relation to leaf structure.- Rem. Sens. Environ. 1, 103-107
- GAUSMAN, H.W., W.A. ALLEN, R. CARDENAS, A.J. RICHARDSON, 1970 d: Relation of light reflectance to histological and physical evaluations of cotton leaf maturity.- Appl. Opt. 9 (3), 545-552
- GAUSMAN, H.W., M.L. SCHUPP, C.L. WIEGAND, D.E. ESCOBAR, R.R. RODRIGUEZ, 1970 e: Reflectance, transmittance and absorptance of electromagnetic radiation of leaves of eleven plant genera with different mesophyll arrangements.- Texas A & M University Tech. Monograph No 7, 38 pp
- GAUSMAN, H.W., W.A. ALLEN, R. CARDENAS, A.J. RICHARDSON, 1971 a: Effect of leaf nodal position on absorption and scattering coefficients and infinite reflectance of cotton leaves, *Gossypium hirsutum* L.- Agron. J. 63, 87-91

- GAUSMAN, H.W., W.A. ALLEN, D.E. ESCOBAR, R.R. RODRIGUEZ, R. CARDENAS, 1971 b: Age effects of cotton leaves on light reflectance, transmittance, and adsorptance and on water content and thickness.- Agron. J. 63, 465-469
- GAUSMAN, H.W., 1973 a: Reflectance, transmittance, and adsorptance of light by subcellular particles of spinach (*Spinacea oleracea* L.) leaves.- Agron. J. 65, 551-553
- GAUSMAN, H.W., 1973 b: Photomicrographic record of light reflected at 850 nanometers by cellular constituents of Zebrina leaf epidermis.- Agron. J. 65, 504-505
- GAUSMAN, H.W., 1973 c: Light reflectance of Peperomia chloroplasts.- J. Rio Grande Valley Hortic. Soc. 27, 86-89
- GAUSMAN, H.W., 1973: Reflectance discrimination of cotton and corn at four growth stages.- Agron. J. 65, 194-198
- GAUSMAN, H.W., 1974 a: Leaf reflectance of near-infrared.- Photogramm. Engn. 40 (2), 183-191
- GAUSMAN, H.W., R. CARDENAS, A.H. GERBERMANN, 1974 b: Plant size, etc., and aerial films.- Photogramm. Engn. 40 (1), 61-67
- GAUSMAN, H.W., R.M. MENGES, D.E. ESCOBAR, J.H. EVERITT, R.L. BOWEN, 1977 a: Pubescence affects spectra and imagery of silverleaf sunflower (*Helianthus argophyllus*).- Weed Sc. 25 (5) 437-440
- GAUSMAN, H.W., R.M. MENGES, D.E. ESCOBAR, J.H. EVERITT, R.L. BOWEN 1977 b: Detection of silverleaf sunflower (*Helianthus argophyllus* Torr & Gray) in Southern Texas pastures by IR Color aerial photography.- Agric. Res. Serv., USDA, Weslaco, Texas Tech. Rpt. 7754, 7 pp.
- GAUSMAN, H.W., 1977: Reflectance of leaf components.- Rem. Sens. Environm. 6, 1-9
- GAUSMAN, H.W., D.E. ESCOBAR, R.R. RODRIGUEZ, C.E. THOMAS, R.L. BOWEN, 1978: Ozone damage detection in cantaloupe beans.- Photogramm. Engn. Rem. Sens. 44 (4), 481-485
- GEIDEL, H., 1970: Mathematik für Agrarwissenschaftler und Biologen.- Verl. E. Ulmer, 162 pp.
- GERBERMANN, A.H., H.W. GAUSMAN, C.L. WIEGAND, 1971: Color and color-IR films for soil identification.- Photogramm. Engn. 37, 359-364
- GIRARD, C.-M., 1974: Luftbilder und landwirtschaftliche Ökologie.- Proc. XII Int. Congr. ISP, Ottawa, Kanada, 414 (Abstr.)

- GOFFART, H., 1952: Zucker 5, 315-317
- GOFFART, H., 1953: Z. Zuckerind. 3, 315-317
- GOFFART, H., 1954: Zucker 7, 130-137
- GOLDEN, A.M., 1960: Survival of emerged larvae of the sugar beet nematode (*Heterodera schachtii*) in water and soil.- *Nematologica* 5, 32-36
- GOODMAN, M.S., 1959: A technique for the identification of farm crops in aerial photographs.- *Photogramm. Engn.* 25, 131-137
- GRIFFIN, G.D., 1974: Determination of *Heterodera schachtii* populations and their relations to economic losses of sugar beets.- *J. Nematol.* 7 (4), 347-351
- GUYOT, G., 1977: Méthodes d'étude de la réflectance des couverts végétaux utilisées à l'INRA.- Meet ISP Comm. VII WG 9 Freiburg, June 14-16 (unveröff.)
- HAEFNER, H., 1967: Airphoto interpretation of rural land use in Western Europe.- *Photogrammetria*, 143-152
- HAEFNER, H., R. GFELLER, 1972: Infrarot-Luftbild und Mikrodensitometermessung zur Untersuchung von Herbizdiversuchsanlagen.- Arbeitsber. zuhanden der CIBA-Geigy AG, Geogr. Inst. d. Univ. Zürich, 16 pp.
- HAEFNER, H., H. MAURER, 1973: Digital image processing for land use interpretation.- *Proc. Symp. IUFRO S 6.05, Freiburg*, 447-465
- HAEFNER, H., C. ZELLER, K. MAAG, 1971: Ektachrome infrared aero film for studying herbicide test crop fields.- *Papers from the 37th ASP Convention, Washington D.C.*, 64-77
- HANSEN, J.H., 1973: Techniques for determining color differences of imaged vegetation on color IR-film.- *Proc. IUFRO S 6.05, Freiburg*, 467-480
- HARNAPP, V.R., C.G. KNIGHT, 1971: Remote sensing of tropical agricultural systems.- *Proc. 7th Symp. Remote Sens. Env.*, 409-433
- HARRIS, J.R., 1977: Low-cost aerial photography for monitoring crops and soils. Preprint: Seminar on Agricultural Aviation, Rubber Res. Inst. of Malaysia and Agric. Inst. of Malaysia, 23 pp.
- HART, W.G., S.J. INGLE, M.R. DAVIS, C. MANGUM, 1973: Aerial photography with infrared colour films as a method of surveying for citrus blackfly.- *J. Econ. Entomology* 66 (1), 190-194

- HART, W.G., V.I. MYERS, 1968: Infrared aerial color photography for detection of populations of brown soft scale in citrus groves.- J. Econ. Entomology 61 (5), 617-624
- HARTGE, K.W., 1971: Die physikalische Untersuchung von Böden.- Ferd. Enke Verl. Stuttgart 168 pp.
- HAYDN, R. J. BODECHTEL, R.H. DITTEL, 1975: Analog-digitale Verarbeitung multispektraler Daten.- Symp. Erderk. DFVLR/DPG, München 573-589
- HEALD, C.M., W.H. THAMES, C.L. WIEGAND, 1972: Detection of *Rotylenchus reniformis* infestations by aerial infrared photography.- J. Nematol. 4 (4), 298-300
- HILDEBRANDT, G., 1957: Forsteinrichtungsarbeiten mit Hilfe von Luftbildern.- Allg. Forst- u. Jagdzeitschr., 58-64
- HILDEBRANDT, G., 1962: Ein Vergleich der forstlichen Interpretation panchromatischer und infraroter Luftbilder.- Trans. Symp. Photointerpretation, Delft, 239-244
- HILDEBRANDT, G., 1966: Vom ersten Luftbild zur Satellitenphotogrammetrie.- Jahresber. Dt. Forstverein e.V., 121-141
- HILDEBRANDT, G., H. KENNEWEG, 1968: Falschfarben-Luftbilder zur Erkennung von Waldschäden.- Umschau 11
- HILDEBRANDT, G., H. KENNEWEG, 1970: Vegetationsschäden und ihre Erkennung im Luftbild.- Allg. Forstzeitschr. 35, 741-744
- HILDEBRANDT, G., 1973: Informationen aus Luftbildern.- Freiburger Universitätsblätter 42, 23-37
- HILDEBRANDT, G., 1974: Luftbilddauswertung 1887 - zwei Dokumente aus den Anfängen der forstlichen und landeskulturellen Luftbildinterpretation.- Proc. Symp. ISP Comm. VII, Banff, Alberta, Canada, 507-514
- HILDEBRANDT, G., 1976: Zur Situation der Fernerkundung.- Bildmessung und Luftbildwesen 44 (6), 245-248
- HIRLING, H., 1970: Untersuchung von Bodenproben auf Kartoffelnematoden (*Heterodera rostochiensis* Woll.) mit der Sieb-Schlamm-Methode und mit dem Biotest nach Behringer.- Z. Pflanzenkrankh. Pfl.schutz 77 (9), 498-505
- HOFFMANN, H., 1974: Über die Luftbildinterpretation nematodenbedingter Ertragsverluste.- Ber. 13. Tag "Probleme der Phytonematologie" Groß Lüsewitz, 131-132 (Abstr.)

- HOLLNAGEL, J., 1964: Untersuchungen über die Verteilung der Zysten des Kartoffelnematoden (*Heterodera rostochiensis*) in einem Felde sowie zur Methodik der Befallsermittlung für Zwecke der Flurneueordnung.- Wiss. Z. Univ. Rostock, Math. Nat. Reihe 13, 443-448
- HOOPER, 1977: The use of aerial photography in crop, pest, and disease studies in England.- Meet. CNRS, Paris, Dec. 9 (unveröff.)
- HOWARD, J.A., 1970: Aerial Photo-Ecology.- Faber & Faber Ltd., London, 264 pp.
- INGLE, S.J., M.R. DAVIS, W.G. HART, 1975: An improved method for detection and survey of the imported fire ant. 5th Workshop on Colour Aerial Photography, Sioux Falls, SD, 67-77
- IWANOWSKI, D., 1907: Über die Ursachen der Verschiebung der Absorptionsbänder im Blatt.- Ber. dtsch. bot. Ges. 25, 416-429
- JACKSON, H.R., W.A. HODGSON, V.R. WALLEN, L.E. PHILPOTTS, J. HUNTER, 1971: Potato late blight intensity levels as determined by microdensitometer studies of false-color aerial photographs.- J. Biol. Photogr. Ass. 39 (2), 101-106
- JACKSON, H.R., V.R. WALLEN, D. GALWAY, S.W. McDIARMID, 1974: Corn aphid infestation computer analyzed from aerial color-IR.- Photogramm. Engn. 40, 943-952
- JACKSON, H.R., V.R. WALLEN, 1975: Microdensitometer measurements of sequential aerial photographs of field beans infected with bacterial blight.- Phytopathology 65, 961-968
- JACKSON, H.R., V.R. WALLEN, 1976: The epiphytology of late blight of potato monitored by sequential color infrared aerial photography.- J. Appl. Photogr. Engn. 2 (4), 207-212
- JÄGER, H., 1960: Das Luftbild im Dienste der historischen Aussage.- In: Landeskundliche Luftbildauswertung im mitteleuropäischen Raum, H. 3, Bad Godesberg
- JOHNSON, P.L., 1965: Radioactive contamination to vegetation.- Photogramm. Engn. 31, 984-990
- JONES, 1956: Soil populations of beet eelworm (*Heterodera schachtii* Schm.) in relation to cropping. 2. Microplot and field plot results.- Ann. Appl. Biol. 44 (1), 25-56
- KADRO, A., 1973: Die Auswertung von Infrarot-Farbluftbildern für eine Inventur des Vitalitätszustandes der städtischen Straßenbäume in Freiburg i. Br.- Dipl.-Hausarbeit Universität Freiburg, 43 pp.

- KADRO, A., W. FISCHER, 1976: Neue Ergebnisse von Reflexionsmessungen in situ an Vegetationsbeständen.- Proc. XVI IUFRO World Congr., Oslo, 23-34
- KADRO, A., 1977: Sepktrale Reflexion land- und forstwirtschaftlicher Kulturen während der Vegetationsperiode.- Ber. z. Symp. FMP, 439-448
- KÄMPFE, L., 1962: Vergleichende Untersuchungen zur Autökologie von *Heterodera rostochiensis* Wollenweber und *Heterodera schachtii* Schmidt.- VEB Gustav Fischer Verl. Jena, 205 pp.
- KANEMASU, E.T., 1974: Seasonal canopy reflectance patterns of wheat, sorghum, and soybeans.- Rem. Sens. Environ. 3, 43-47
- KARAN, P.P., 1960: A land use reconnaissance in Nepal by aero-field techniques and photography.- Proc. Am. Philosoph. Soc. 172-187
- KENNEWEG, H., 1972: Die Verwendung von Farb- und Infrarot-Farbluftbildern für Zwecke der forstlichen Photo-Interpretation unter besonderer Berücksichtigung der Erkennung und Abgrenzung von Kronenschäden in Fichtenbeständen.- Diss. Universität Freiburg/Br. 253 pp
- KESSLER, R., 1977: Eine quantitative Texturuntersuchung von Bildobjekten auf verschiedenen Filmen in zwei Flughöhen und Beurteilung der verwendeten Parameter.- Diplom-Hausarbeit Univ. Freiburg, 79 pp.
- KNIPLING, E.G., 1970: Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation.- Rem. Sens. Environm. 1, 155-159
- KOCH, P.H., 1970: Die Shifting Cultivation und ihre Luftbildauswertung.- Diss. Univ. Zürich, 136 pp.
- KÜDER, A., 1979: Diplom-Hausarbeit Univ. Hohenheim (in Vorbereitung)
- KOEPKE, P., K.T. KRIEBEL, 1978: Influence of measured reflectance properties of vegetated surfaces on atmospheric radiance and its polarization.- Appl. Opt. 17 (2), 260-264
- KOHN, C.F., 1952: An essay key for the photoidentification of farm crops at several intervals during the growing season in Northern Illinois.- Parts 1-7, ONR Geogr. Branch, Tech. Rpt. No.3, Washington D.C.
- KOLB, A. 1962: Sturmflut 17. Feb. 1962. Morphologie der Deich- und Flurschädigungen zwischen Moorbürg und Cranz.- In: Hamburger Studien, H. 16, Hambrüg

- KRIEBEL, K.T., 1973: Das spektrale Reflexionsvermögen einer bewachsenen Oberfläche.- Diss. Univ. München, 123 pp.
- KRIEBEL, K.T., 1977: Reflexionsterminologie.- Meet ISP WG VII-9, Freiburg, June 14-16 (unveröff.)
- KRIEBEL, K.T., 1977: Reflection properties of vegetated surfaces: tables of measured spectral biconical reflectance factors.- Münchner Universitäts-Schriften, Fachber. Physik, wiss, Mitt. Nr. 29, 82 pp
- KRIEBEL, K.T., 1978 a: Terminology of reflection, transmission, scattering, and emission: adjustments of concepts.- Appl. Opt. 17 (2), 157-158
- KRIEBEL, K.T., 1978 b: Measured spectral bidirectional reflection properties of four vegetated surfaces.- Appl. Opt. 17 (2), 253-259
- KRIEBEL, K.T., W. SCHLÖTER, J. SIEVERS, 1975: Zur Definition und Messung der spektralen Reflexion natürlicher Oberflächen.- Bildmessung und Luftbildwesen 43 (1), 42-50
- KÜSTERS, J., 1974: persönl. Mitt. (Fa. Pfeifer & Langen)
- KÜSTERS, J., STIEMERLING, 1975: persönl. Mitt. (Fa. Pfeifer & Langen)
- KUHL, A.D., 1970: Color and IR photos for soils.- Photogramm. Engn. 36 (5), 475-482
- KUMAR, R., L. SILVA, 1973: Light tracing through a leaf cross section.- Appl. Opt. 12, 2950-2954
- LADIGYNA, N.M., 1960: Vlijanie temperatury i vlaznosti na steblevych nematod kartofelja i luka.- Trudy naukno-issl.Inst. biol. i biol. fak. Charkowsk Univ. 27, 101-104
- LADIGYNA, N.M., 1963: Metody issledovnija nematod sel'skochozjajstvennykh rastennyij, poev i nasekomych, Moskva-Leningrad, 91-114
- LANGE, G., 1977: On detection of erroneous polygons when segmenting images.- Proc. Symp. Image Processing, Graz, Austria; In: Mitt. Geodät. Inst. Graz, Vol 29
- LANGE, G., 1978: Features and applicability of PODIUM.- Proc. Conf. Machine-Aided Image Analysis, Oxford; In: Conf. Series Inst. Phys.
- LASAREFF, P., 1927: Über die Absorption des Lichtes durch die Blätter und die Absorption von Chlorophyllösungen.- Biochem. Z. 182, 131-133
- LEAMER, R.W., V.L. MYERS, L.F. SILVA, 1973: A spectroradiometer for field use.- Rev. Sc. Instr. 44, 611-614

- LEROUX, P., 1974: Luftbildtechnik und Heuschreckenbekämpfung.- Proc. 12th Int. Congr. ISP, Ottawa, Kanada, 425 (Abstr.)
- LINS, H.F., 1976: Land-use mapping from Skylab S-190 B photography.- Photogramm. Engn. Rem. Sens. 42 (3), 301-307
- LINSBAUER, L., 1901: Untersuchungen über die Durchleuchtung von Laubblättern.- Beih. Bot. Zbl. 10, 53-89
- MANZER, F.E., G.R. COOPER, 1965: Photogrammetric estimation of potato late blight incidence.- Am. Potato J. 42, 293-294 (Abstr.)
- MANZER, F.E., G.R. COOPER, 1967: Aerial photographic methods of potato disease detection.- Univ. Maine Agric. Exp. Stn., Bull. 646, 15 pp.
- MAURER, H., 1965: Untersuchungen zur Unterscheidbarkeit landwirtschaftlicher Kulturen im farbigen Luftbild.- Diss. Univ. Zürich, 100 pp.
- MEIENBERG, P., 1966: Die Landnutzungskartierung von Pan-, Infrarot- und Farbluftbildern.- Münchner Studien zur Sozial- und Wirtschaftsgeographie, Kallmünzer/Regensburg
- MEYER, M.P., L. CALPOUZOS, L., 1968: Detection of crop diseases.- Photogramm. Engn. 34 (6), 554-557
- Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, ADAS, Science Service, K.K., 1975: Annual Report.- London, HMSO, 308 pp.
- MORIARTY, F., 1960: Laboratory errors associated with estimation of the population density of *Heterodera* species in soil.- Am. Appl. Biol. 48, 665-680
- MORIARTY, F., 1966: The decline of a field population of beet eelworm (*Heterodera schachtii*).- Nematologica 12, 349-354
- MYERS, V.I., W.A. ALLEN, 1968: Electrophotical remote sensing methods as nondestructive testing and measuring techniques agriculture.- Appl. Opt. 7, 1819-1838
- NAKANO, T., H. KADOMURA, T. KIKUCHI, I. MATSUDA, 1962: Landform classification for flood prevention using aerial photographs.- In: Transactions on the Symposium on Photo Interpretation, Delft 122-127
- NASA, 1973: Corn blight watch experiment.- Final Report, Vols. I-III, Johnson Space Center, Houston Texas
- MacNEIL, J.D., R.S. DOWNING, M. HIKICHI, 1974: Diffuse reflectance spectroscopy: applications in measuring mite-feeding injury to orchard leaves.- Can. J. Plant Sci. 54, 505-509

- NOLTE, H.W., 1959: Die unterschiedliche Flächenverteilung als begrenzender Faktor bei der Bonitierung auf Nematodenbefall der Einzelpflanze.- Tagungsber. DAL, Berlin, 23-31
- NORMAN, G.G., N.L. FRITZ, 1965: Infrared photography as an indicator of disease and decline in citrus trees.- Proc. Fla. St. Hortic. Soc. 78, 59-63
- NORMAN, G.G., 1968: Colour infrared for insect on citrus trees.- In: Manual of Color Aerial Photography, 388-389
- NUNNALLY, N.R., 1974: Interpreting land use from remote sensor imagery.- In: Estes & Senger (Ed.) Remote Sensing, J. Wiley & Sons, p. 167-188
- OHYA, M., 1969: Die Überflutung bei Nagoya (Japan) im Gefolge des Taifuns "Vera" (Isewan-Taifun).- Geogr. Rundschau 13 (9), 462-475
- OLSON, C.E., W.G. RHODE, 1970: Multispectral sensing of moisture stress.- 3rd Ann. Earth Res. Progress Rev., Vol. 2
- PACKMAN, D.J., L.E. PHILPOTTS, 1955: Elementary agricultural air photo interpretation.- Canada Dept. of Agric. Marketing Serv., Econ. Div., Ottawa, 103 pp.
- PARK, A.B., 1977: A crop production alarm system.- In: Earth Observation Systems for Resource Management and Environmental Control, Plenum Press, New York & London, 331-335
- PARRY, J.T., W.R. COWAN, J.A. HEGINBOTTOM, 1969: Soil studies using color photos.- Photogramm. Engn. 35 (1), 44-56
- MACPHAIL, D.D., 1971: Photomorphologic mapping in Chile.- Photogramm. Engn. 37, 1139-1148
- PHILPOTTS, L.E., V.R. WALLEN, 1969: IR color for crop disease identification. Photogramm. Engn. 35 (11), 1116-1125
- PIECH, K.R., J.E. WALKER, 1974: Interpretation of soils.- Photogramm. Engn. 40, 87-94
- POKROWSKI, G.J., 1925: Über die Lichtabsorption von Blättern einiger Bäume.- Biochem. Z. 165, 420-426
- POMMERING, J.A., M.G. CLINE, 1953: The accuracy of soil maps prepared by various methods that use aerial photo interpretation.- Photogramm. Engn. 19, 809-817
- PRESCOTT, J.A., J.K. TAYLOR, 1930: The value of aerial photography in relation to soil surveys and classification.- J. Coun. Sc. and Ind. Res. Aust., 3, 229-230

- RABIDEAU, G.S., C.S. FRENCH, A.S. HOLT, 1946: The absorption and reflection spectra of leaves, chloroplast suspensions and chloroplast fragments as measured in an Ulbricht Sphere.- Am. J. Bot. 33, 769-777
- RADEMACHER, B., O. SCHMIDT, 1933: Die bisherigen Erfahrungen in der Bekämpfung des Rüben nematoden (*Heterodera schachtii* Schm.) auf dem Wege der Reizbeeinflussung.- Arch. Pfl.bau 10, 237-296
- RASKI, J.D., 1950: The life history and morphology of the sugar-beet nematode, *Heterodera schachtii* Schmidt.- Phytopathology 40 (8), 136-152
- RASKI, J.D., 1952: On the host range of the sugar-beet nematode in California.- Plant Dis. Rpt. 36 (1), 5-7
- REICHERT, P., 1975: Erkennung und Quantifizierung biotisch bedingter Schäden in landwirtschaftlichen Kulturen.- Zus.fassg. 1. Symp. FMP, DFVLR Oberpfaffenhofen, Dez. 1975, 31-32
- REINKE, J., 1886: Photometrische Untersuchungen über die Absorption des Lichtes in den Assimilationsorganen.- Bot. Ztg. 44 (9) bis (14), 162-247
- RICHARDSON, A.J., W.A. ALLEN, J.R. THOMAS, 1969: Discrimination of vegetation by multispectral reflectance measurements.- Proc. 6th Symp. Rem. Sens. Environm., Univ. Michigan. Ann Arbor, Vol. II, 1143-1156
- RICHARDSON, A.J., C.L. WIEGAND, H.W. GAUSMAN, J.A. CUELLAR, A.H. GERBERMANN, 1975: Plant, soil and shadow reflectance components of row crops.- Photogramm. Engn. Rem. Sens. 41 (11), 1401-1407
- ROBERTS, E.H., M.J. GIALDINI, 1973: Field measurements of the spectral reflectance of natural features.- 30th Ann. Meet. ASP, 61-62 (Abstr.)
- ROHDE, H., 1977: Untersuchungen zur Erkennung von Vitalitätsunterschieden an Kiefern durch digitale Auswertung von Infrarot-Farbluftbildern.- Diss. Universität Freiburg/Br., 284 pp.
- RONKE, J.D., M.E. AUSTIN, 1951: The use of air-photos for soil classification and mapping in the field.- Photogramm. Engn. 17, 738-747
- RUPPERT, K., P. MEIENBERG, 1964: Das Luftbild als Hilfsmittel in der agrargeographischen Forschung.- Umschau in Wissenschaft und Technik 7/64, 207-210

- SACHS, J., 1860: Über die Durchleuchtung der Pflanzentheile.-
Sitzungsber. d. Königl. Acad. d. Wissensch. zu Wien, 65, 2-43
- SANWALD, E., W. KOCH, 1975: Änderungen des spektralen Remissions-
verhaltens von Pflanzen unter der Einwirkung von Herbiziden.-
Mitt. BBA, H. 165, 187 (Kurzfassg.)
- SANWALD, E., K. ZITTERELL, W. KOCH, 1977: Calibration of the ZEISS
RA 3 d/0° spectrophotometric diffuse reflectance attachment for
the measurement of leaves of agricultural crops and weeds.-
Meet. ISP WG VII-9, Freiburg, June 14-16 (unveröff.)
- SANWALD, E., H. WALTER, W. KOCH, 1979: Grundlagen und Anwendung
der Fernerkundung in Pflanzenproduktion und Pflanzenschutz (in
Vorbereitung)
- SCHACHTSCHABEL, P., 1954: Z. Pflanzenern. Düng. Bodenkde. 67, 9
- SCHANDA, E. (Hrsg.) 1976: Remote Sensing for Environmental Sciences.-
Springer Verl. Berlin/Heidelberg/New York 367 pp.
- SCHANDERL, H., W. KAEMPFERI, 1953: Über die Strahlungsdurchlässig-
keit von Blättern und Blattgeweben.- Planta 18, 700-750
- SCHACHT, H., 1859: Über einige Feinde und Krankheiten der Zucker-
rübe.- Z. Ver. Rübenzucker-Ind., Zool.verl. 9, 390
- SCHEPIS, E.L., 1968: Time-lapse remote sensing in agriculture.-
Photogramm. Engn. 34 (11), 1166-1179
- SCHLICHTING, E., H.-P. BLUME, 1966: Bodenkundliches Praktikum.-
Verl. Paul Parey, 209 pp.
- SCHMIDT, A. 1871: Über den Rübenennematoden (*Heterodera schachtii*).-
Z. Ver. Rübenzucker-Ind., Zool.verl. 22, 67-75
- SCHMITT, W., 1936: Einsatz des Luftbildes in Mecklenburg für die
Reichsbodenschätzung und für die Erfassung vorgeschichtlicher
Denkmäler.- BuL 4, 32-39
- SCHNEIDER, S., 1974: Luftbild und Luftbildinterpretation.- de Gruy-
ter Verl. Berlin/New York, 530 pp.
- SCHOEDLER, J., 1973: Landnutzungsinterpretation mit Hilfe farbiger
Luftbilder im Unterwallis.- Diss. Universität Zürich
- SCHWIDEFSKY, K., 1960: Über die bei Luftaufnahmen wirksame Beleuch-
tung.- Bildmessung und Luftbildwesen 28 (1), 46-62
- SEYBOLD, A., 1932: Über die optischen Eigenschaften der Laubblätter.
I.- Planta 16, 195-226
- SEYBOLD, A., 1933 a: Über die optischen Eigenschaften der Laub-
blätter. II.- Planta 18, 479-508
- SEYBOLD, A., 1933 b: Über die optischen Eigenschaften der Laub-
blätter. III.- Planta 20, 577-601

- SEYBOLD, A. 1933 c: Über die optischen Eigenschaften der Laubblätter. IV.- *Planta* 21, 251-265
- SEYBOLD, A., F. BRAMBRING, 1933: Über die thermischen Eigenschaften der Laubblätter. I.-*Planta* 20, 201-229
- SEYBOLD, A., A. WEISSWEILER, 1942 a: Spektrophotometrische Messungen an grünen Pflanzen und an Chlorophylllösungen.- *Bot. Arch.* 43, 252-290
- SEYBOLD, A., A. WEISSWEILER, 1942 b: Weitere spektrophotometrische Messungen an Laubblättern und an Chlorophylllösungen sowie an Meeresalgen.- *Bot. Arch.* 44, 102-153
- SEYBOLD, A., A. WEISSWEILER, 1943: Clarification of some elementary optical problems in photophysiology.- *Bot. Arch.* 44, 456-520
- SHULL, C.A., 1929: A spectrophotometric study of reflection of light from leaf surfaces.- *Bot. Gaz.* 87, 583-607
- SIEVERS, J., 1976: Zusammenhänge zwischen Objektreflexion und Bildschwärzung in Luftbilder.- *Dt. Geodät. Komm.*, Reihe C, Heft Nr. 221, 129 pp.
- SIMON, M., 1955: L'étude du rapport entre le pH du sol et les nématodes.- *Publ. Inst. Belge Amélior. Better.* 22 (3), 85-89
- SIMONSON, R.W., 1950: Use of aerial photographs in soil surveys.- *Photogramm. Engr.* 16, 308-315
- SINCLAIR, T.R., 1968: Pathway of solar radiation through leaves.- *M.Sc.Thesis*, Purdue Univ., Lafayette, Indiana
- SINCLAIR, T.R., M.M. SCHREIBER, R.M. HOFFER, 1973: Diffuse reflectance hypothesis for the pathway of solar radiation through leaves.- *Agron. J.* 65, 276-283
- SPRENGER, P., 1977: Nematodenbekämpfung mit chemischen Mitteln in Groß-Gerau.- *Deutsche Zuckerrübenzeitung* 14 (2), 7
- SPURR, S.S., 1960: Photogrammetry and photo-interpretation.- The Ronald Press Company, New York, 472 pp.
- STEELE, A.E., 1971: Orientation and development of *Heterodera schachtii* larvae on tomato and sugarbeet roots.- *J. Nematol.* 3 (4), 424-426
- STEELE, A.E., 1972: Development of *Heterodera schachtii* on large rooted crop plants and the significance of root debris as substrate for increasing field infestations
- STEELE, A.E., 1975: Population dynamics of *Heterodera schachtii* on tomato and sugar beet.- *J. Nematol.* 7 (2), 105-111

- STEINER, D., 1961 a: Die Jahreszeit als Faktor bei der Landnutzungsinterpretation.- In: Landeskundliche Luftbildauswertung im mitteleuropäischen Raum, H. 5, Bad Godesberg
- STEINER, D., 1961 b: Eine einfache Methode der Reflexionsmessung im Gelände und ihre Anwendung bei Problemen der Landnutzungsinterpretation von Luftbildern.- BuL 29 (4), 123-133
- STEINER, D., 1962: Zur Technik und Methode der Landnutzungsinterpretation von Luftbildern.- Ber. z. dt. Landeskunde 29 (1), Bad Godesberg
- STEINER, D., 1971: A methodology for the automated photo-interpretation of rural land-use types.- In Grasselli (Ed.): Automatic Interpretation and Classification of Images
- STEINER, D., H. MAURER, A. KILCHENMANN, 1966: Quantitative Auswertung von Farb-Luftbildern zur Identifizierung landwirtschaftlicher Kulturen.- BuL 34, 47-56
- STEINMETZ, H.J., 1957: Vergleich farbiger und schwarz-weiß-Luftaufnahmen auf dem Gebiet der Bodenkunde, Bodenerhaltung und Landschaftspflege.- Bildmessung und Luftbildwesen 25 (4), 116-118
- STELTER, H., RAEUBER, A., 1962: Untersuchungen über Methoden und Probenahme zur Feststellung der Verseuchung mit dem Kartoffelnematoden *Heterodera rostochiensis* Wollenweber.- Z. Pfl.krankh. Pfl.path. Pfl.schutz 69, 577-586
- SUITS, G.H., 1971: The calculation of the directional reflectance of a vegetation canopy.- Rem. Sens. Environ. 2, 117-125
- SUITS, G.H., 1972: The cause of azimuthal variation in directional reflectance on vegetative canopies.- Rem. Sens. Environ. 2, 175-182
- SUITS, G.H., G.R. SAFIR, 1972: Verification of a reflectance model for mature corn with application to corn blight detection.- Rem. Sens. Environm. 2, 183-192
- TAUBENHAUS, J.J., W.N. EZEKIEL, C.B. NEBLETTE, 1929: Airplane photography in the study of cotton root rot.- Phytopathology 19, 1025-1029
- TARKINGTON, R.G., 1968: Photography: an electronic-ionic medium for remote sensing application.- Proc. 5th Symp. Rem. Sens. Environ., 3-7
- TAWFIK, F.H., M.M. KHODAIR, A.G. ABDEL-SAMIE, M.A. ABDEL-HADY, 1974: Spectral reflectance studies on healthy and fungus-infected cotton and corn plants in Egypt.- 40th Ann. Meet. ASP. (Abstr.)

- THOMAS, J.R., V.I. MYERS, M.D. HELLMAN, C.L. WIEGAND, 1966: Factors affecting light reflectance of cotton.- Proc. 4th Int. Symp. Rem. Sens. Environm., Univ. of Michigan, Ann Arbor, 305-312
- THOMAS, J.R., C.L. WIEGAND, V.I. MYERS, 1967: Reflectance of cotton leaves and its relation to yield.- Agron. J. 59, 551-554
- THOMAS, J.R., G.F. OERTHER, 1977: Aerial photography used for estimation of crop condition.- The Sugar Journal (3), 35-38
- THORNE, G., 1961: Principles of Nematology.- McGraw-Hill Book Comp. Inc., New York, Toronto, London, 553 pp.
- TOTTERDELL, C.J., A.B. RAINS, 1973: Plant reflectance and colour infrared photography.- J. Appl. Ecol. 10, 401-407
- TRAUTH, K., 1977: Unterschiede zwischen visueller und automatisierter Luftbildinterpretation, demonstriert am Beispiel der landwirtschaftlichen Kulturform Rübe.- Dipl.-Hausarbeit Univ. Freiburg, 94 pp. (unveröff.)
- TROLL, C., 1939: Luftbildplan und ökologische Bodenforschung.- Z.d.Ges.f. Erdkunde zu Berlin 7 (8), 241-298
- TROLL, C., 1943: Fortschritte der wissenschaftlichen Luftbildforschung.- Z.d.Ges.f. Erdkunde zu Berlin 7 (10), 277-311
- TUCKER, C.J., L.D. MILLER, R.L. PEARSON, 1975: Shortgrass prairie spectral measurements.-Photogramm. Engn. Rem. Sens.41 (9), 1157-62
- TUCKER, C.J., 1976: Sensor design for monitoring vegetation canopies.- Photogramm. Engn. Rem. Sens. 42 (11), 1399-1410
- TUCKER, C.J., M.W. GARRAT, 1977: Leaf optical system modelled as a stochastic process.- Appl. Opt. 16, 635-642
- TZSCHUPKE, W., 1974: Untersuchungen zur automatischen Identifizierung forstlich bedeutsamer Bildgestalten durch digitale Auswertung von an Infrarot-Farbluftbildern gemessenen Farb- und Texturparametern.- Diss. Uni. Freiburg/Br. 286 pp.
- URSPRUNG, A., 1903: Die physikalischen Eigenschaften der Laubblätter.- Bibliotheca Botanica 60, 58-116
- URSPRUNG, A., 1918: Über die Absorptionskurve des grünen Farbstoffes lebender Blätter.- Ber. dtsh. bot. Ges. 36, 73-85
- VIERORDT, K., 1873: Die Anwendungen des Spektralapparates.- Tübingen 1873, 71 ff.
- VÖLGER, K., 1975: Projekt- und Regionalplanung mit Fernerkundung und EDV.- entwicklung + ländlicher Raum, 6/75, 2-8

- WALLACE, H.R., 1955: Factors influencing the emergence of larvae from cysts of the beet eelworm, *Heterodera schachtii* Schmidt.- J. Helminth. 29, 3-16
- WALLACE, H.R., 1963: The Biology of Plant Parasitic Nematodes.- Edw. Arnold (Publ.) Ltd., London, 280 pp.
- WALLEN, V.R., H.R. JACKSON, 1971: Aerial photography as a survey technique for the assessment of bacterial blight of field beans.- Can. Plant. Dis. Surv. 51 (4), 163-169
- WALLEN, V.R., L.E. PHILPOTTS, 1971: Disease assessment with IR-color.- Photogramm. Engn. 37, 443-446
- WALLEN, V.R., H.R. JACKSON, 1975: Model for yield loss determination of bacterial blight of field beans utilizing aerial infrared photography combined with field plot studies.- Phytopathology 65, 942-948
- WALLEN, V.R., H.R. JACKSON, W.L. JAMES, A.M. SMITH, 1975: Optical density variation in aerial photographs of potato plots infected with *Phytophthora infestans*.- Am. Potato J. 52, 233-238
- WALLEN, V.R., D.A. GALWAY, 1976: Incidence of bacterial blight of field beans in Southwestern Ontario in 1975.- Can. Plant Dis. Surv. 56, 85-87
- WALLEN, V.R., H.R. JACKSON, S.W. McDIARMID, 1976: Remote sensing of corn aphid infestation, 1974 (Hemiptera: Aphididae).- Can. Ent. 108, 751-754
- WALTER, F., 1965: Luftbild und Agrargeschichte.- BuL 33, 123-128
- WEBSTER, J.N., 1972: Economic Nematology.- Academic Press, London/New York, 563 pp.
- WEISCHER, B., W. STEUDEL, 1972: Nematode disease of sugar beet.- In: Webster, Economic Nematology, 49-65
- WENDLANDT, W.W., H.G. HECHT, 1966: Reflectance Spectroscopy.- Intersc. Publ., John Wiley & Sons, New York, London, Sydney
- WIEGAND, C.L., H.W. GAUSMAN, W.A. ALLEN, R.W. LEAMER, 1969: Interaction of electromagnetic energy with agricultural crops.- 2nd Ann. Earth Res. Aircraft Programm, Vol. II, 22, 1-14
- WIEGAND, C.L., R.W. LEAMER, D.A. WEBER, A.H. GERBERMANN, 1971: Multibase and multiemulsion space photos for crops and soils.- Photogramm. Engn. 37, 147-156

- WIEGAND, C.L., H.W. GAUSMAN, W.A. ALLEN, 1972: Physiological factors and optical parameters as basis of vegetation discrimination and stress analysis.- Proc. Sem. Operational Rem. Sens., Falls Church, VA, 82-102
- WILDMAN, W.E., R.A. NEJA, J.K. CLARK, 1976: Low-cost Aerial photography for agricultural management.- Calif. Agric. 30 (4), 4-7
- WILLSTÄTTER, R., A. STOLL, 1918: Untersuchungen über die Assimilation der Kohlensäure.- Springer Verl., Berlin
- WINKELMANN, G., 1978: persönl. Mitt. (Komm. VI-5 ISP)
- WINSLOW, R.D., 1954: Provisional list of host plants of some root eelworms (*Heterodera* spp.).- Ann. Appl. Biol. 41 (4), 591-605
- WOLFF, G., 1966: Luftbilder als diagnostisches Hilfsmittel für operative Arbeiten beim Forstschutz (Rauchschaden) und bei der Bestandesdüngung.- Sozialistische Forstwirtschaft. 16, 140-143
- WOLFF, G., 1974: Über die Interpretierbarkeit der Schadsymptome von Getreide- und Kartoffelnematoden auf Luftbildern.- Ber. 13. Tg. "Probleme der Phytonematologie", Groß Lüsewitz, 129-130 (Abstr.)
- WONG, C.L., W.R. BLEVIN, 1967: Infrared reflectance of plant leaves.- Austr. J. Biol. Sci. 20, 501-508
- WOOLEY, J.T., 1971: Reflectance and transmittance of light by leaves.- Plant Physiol. 47 (5), 656-662
- YOST, E., S. WENDEROTH, 1969: Agricultural and oceanographic applications of multispectral color photography.- Proc. 6th Symp. Rem. Sens. Environ., 145-173
- YOST, E., 1971: Multispectral color for agriculture and forestry.- Photogramm. Engn. 37, 590-604
- YOUNG, J.A., R.A. EVANS, 1972: Predicting the results of herbicide application on rabbitbrush with infrared photography.- Proc. WSSA Meeting, St. Louis, 50 (Abstr.)
- YOUNG, A., R.A. EVANS, P.T. TUELLER, 1976: Remote sensing for optimum herbicide application data for rabbitbrush.- J. of Range Management 29 (4), 342-344
- ZITTERELL, K., 1977: Spektrales Remissions- und Transmissionsverhalten von Pflanzen als diagnostisches Mittel zur Erfassung von endogen und exogen bedingten Zustandsänderungen.- Dipl.-Hausarbeit Univ. Hohenheim, 60 pp. (unveröff.)

ANHANG I

Zusammenstellung der Resultate der Bodenuntersuchungen auf Nematodenbesatz.

Legenden zu den folgenden Tabellen: Fw 1, Fw 2 = Untersuchungen nach der Fenwick-Methode an 2 verschiedenen Anstalten 1 und 2; Zahlenangaben = Anzahl der Zysten mit Inhalt je 100 ml Boden. Bt = Untersuchungen nach dem Biotest-Verfahren; Zahlenangaben = durchschnittliche Anzahl neugebildeter Zysten je Biotest-Vierkammergefäß

Testfeld Nr. Subparzelle	II		III		IV	
	Fw 1	Fw 2 Bt	Fw 1	Fw 2 Bt	Fw 1	Fw 2 Bt
1	52	91 97	20	24 42	5	14 126
2	86	151 69	11	84 38	3	16 46
3	39	155 51	22	56 33	2	8 72
4	52	111 62	28	87 43	0	5 14
5	43	45 56	38	81 48	0	7 19
6	2	3 23	28	63 63	0	8 4
7	2	7 24	14	37 112	0	2 3
8	1	4 8	11	38 49	0	3 3
9	2	1 0	14	25 40	0	1 0
10	1	9 1	2	4 41	0	0 0
11			3	3 57		
12			5	4 2		
13			8	19 34		
14			13	16 90		
15			13	28 113		
16			15	63 69		
17			27	69 48		
18			11	46 67		
19			13	39 76		
20			16	33 38		

(1) Gebiet Ameln; Probenahme 22./23. 8. 1976

(1) Gebiet Ameln; Probenahme 22./23. 8. 1976 (Fortsetzung)

Test- feld Nr.	V			VI			VIII			IX			X		
	Fw 1	Fw 2	Bt	Fw 1	Fw 2	Bt	Fw 1	Fw 2	Bt	Fw 1	Fw 2	Bt	Fw 1	Fw 2	Bt
Sub- parzelle															
1	9	3	58	0	3	7	19	27	25	48	52	65	28	104	23
2	2	3	95	0	2	2	69	17	28	49	72	67	25	124	0
3	0	0	10	0	0	2	27	41	35	35	47	30	7	58	11
4	0	3	43	0	0	0	4	28	22	40	58	50	12	66	3
5	0	0	6	1	0	0	16	41	44	15	33	23	6	51	19
6	0	2	16	0	0	0	28	65	28	4	19	57	7	48	15
7	0	0	26	0	0	0	47	70	47	5	14	35	6	39	7
8	0	0	16	0	0	0	9	51	23	6	26	45	14	32	9
9	0	4	19	0	0	0	11	48	14	3	23	55	15	37	0
10	0	0	18	0	0	1	15	105	34	5	17	52	11	38	9

(2) Gebiet Ameln; Probenahme 8. 8. 1977

Testfeld Nr.	II			III			IV			V		
	Fw 1	Fw 2	Bt	Fw 1	Fw 2	Bt	Fw 1	Fw 2	Bt	Fw 1	Fw 2	Bt
1	5	22	159	20	37	40	43	70	25	16	34	40
2	5	21	120	36	19	97	30	68	91	23	33	211
3	5	20	132	7	36	69	42	56	42	22	66	165
4	10	24	141	20	32	87	25	40	37	19	59	26
5	34	38	40	8	27	30	43	51	17	12	41	39
6	38	49	33	1	11	54	58	55	41	16	53	95
7	75	75	74	2	11	61	57	46	60	22	54	35
8	35	60	53	4	4	55	25	55	110	16	34	108
9	60	62	64	6	17	48	19	42	65	16	20	16
10				15	15	53	18	37	60	26	16	3

(2) Gebiet Amein; Probenahme 8. 8. 1977 (Fortsetzung)

Testfeld Nr	VI			VII			VIII			IX			X		
	Fw 1	Fw 2	Bt	Fw 1	Fw 2	Bt	Fw 1	Fw 2	Bt	Fw 1	Fw 2	Bt	Fw 1	Fw 2	Bt
1	72	44	60	16	27	69	17	12	391	15	25	222	40	53	62
2	45	81	5	14	25	95	20	20	67	18	41	52	16	62	54
3	37	51	63	31	24	98	33	39	253	25	44	55	21	44	81
4	27	52	97	23	29	9	36	28	331	13	25	99	40	54	168
5	44	66	44	12	14	61	7	21	101	13	14	174	49	39	92
6	6	31	62	8	10	32	8	7	138	2	23	34	23	47	38
7	3	16	223	10	21	55	3	3	37	14	8	171	20	22	20
8	6	0	84	11	14	42	1	13	34	3	19	134	5	18	113
9	9	10	119	17	16	67	4	9	50	2	5	175	3	4	140
10							8	20	11	1	6	31	1	7	198

(3) Gebiet Groß Gerau/Alzey; Probenahmetermini 5. 8. 1977 und 2. 9. 1977

Anmerkung: Im Versuchsjahr 1976 wurden bei der 1. Probenahme nur die Bodenproben von Testfeld III vergleichend untersucht (s. Tab. 11). Die Bodenproben des 2. Termins 1976 konnten infolge unsachgemäßer Lagerung seitens der Untersuchungsanstalt nicht nach dem Biostest-Verfahren untersucht werden. Die hier angeführten Daten beschränken sich daher auf das Versuchsjahr 1977

Testfeld Subparzelle	I				II				III				V			
	1. Termin		2. Termin		1. Termin		2. Termin		1. Termin		2. Termin		1. Termin		2. Termin	
	Fw	Bt	Fw	Bt	Fw	Bt	Fw	Bt	Fw	Bt	Fw	Bt	Fw	Bt	Fw	Bt
1	3	0	1	0	2	8	2	0	0	0	4	1	0	0	7	0
2	1	0	2	0	0	7	5	1	4	0	4	0	2	2	1	0
3	0	0	0	0	3	20	4	0	0	0	0	0	0	0	7	0
4	1	0	4	0	2	9	3	1	0	0	0	2	2	1	3	0
5	0	0	0	0	1	25	3	0	0	1	1	0	0	0	4	0
6	0	0	0	0	3	4	7	1	0	1	1	0	2	1	2	0
7	0	1	0	0	7	7	1	1	0	0	0	0	0	2	2	0
8					2	2	0	3	0	0	0	0	0	2	1	0
9									1	1	0	0	0	2	3	0
10									0	3	0	0	3	3	4	0

(3) Gebiet Groß Gerau/Alzey; Probenahmetermine: 5. 8. 1977 und 2. 9. 1977 (Fortsetzung)

Testfeld	VI				VII				VIII				IX			
	1. Termin		2. Termin		1. Termin		2. Termin		1. Termin		2. Termin		1. Termin		2. Termin	
Subparzelle	Fw	Bt	Fw	Bt	Fw	Bt	Fw	Bt	Fw	Bt	Fw	Bt	Fw	Bt	Fw	Bt
1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	10	2	1	29
2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	9	23	2	20
3	1	1	1	1	3	0	0	1	0	0	1	0	4	8	1	25
4	0	12	1	1	16	3	2	25	2	5	1	1	14	14	4	58
5	0	0	5	0	7	1	4	27	21	10	0	0	7	10	0	68
6	0	0	3	0	3	0	0	11	5	23	0	0	6	5	5	64
7	0	0	2	0	3	0	3	26	1	0	2	15	6	4	1	61
8	0	0	3	0					1	0	0	2	12	4	10	61
9									0	0	0	25	21	13	4	50
10													13	1	1	95
11													10	4	1	14
12													22	6	0	27
13													2	14	3	62
14													16	12	2	13
15													30	4	10	55
16													24	6	12	38
17													5	3	1	24
18													8	0	0	5
19													2	0	1	1
20													0	1	0	36
21													7	0	0	17
22													1	0	0	0
23													0	0	1	1
24													0	0	0	0
25													2	0	0	0

(3) Gebiet Groß Gerau/Alzey; Probenahmetermine: 5. 8. 1977 und 2. 9. 1977 (Fortsetzung)

Testfeld	XI				XII			
	1. Termin		2. Termin		1. Termin		2. Termin	
Subparzelle	Fw	Bt	Fw	Bt	Fw	Bt	Fw	Bt
1	0	1	0	0	1	0	2	0
2	1	0	0	0	3	0	0	1
3	1	0	8	47	2	0	0	6
4	1	0	7	45	4	2	2	6
5	2	0	2	49	12	9	0	24
6	2	0	0	2	9	1	1	13
7	0	0	0	14	5	5	2	19
8					1	0	5	8
9					0	0	2	19
10					1	0	3	40
11					2	0	0	53

ANHANG II

Zusammenstellung der Resultate der Bodenuntersuchungen auf Nährstoffe (P_2O_5 , K_2O , MgO) und Säuregrad aus dem Gebiet Ameln 1976.
Probenahmetiefe 25 cm.

Legende zu den folgenden Tabellen: Die Testfelder sind mit römischen Zahlen gekennzeichnet;

1 = Probenahme am 24. 6. 1976, 2 = Probenahme am 20. 8. 1976

[illegible]

Pflanzenverfügbares Magnesium (mg je 100 g Boden) Testfelder im Gebiet Ameln

Sub- parzelle	Testfeld Nr.											
	I1 I2	II1 II2	III1 III2	IV1 IV2	V1 V2	VI1 VI2	VII1 VII2	VIII1 VIII2	IX1 IX2	X1 X2		
1	6 5	7 3	5 4	7 5	5 4	3 4	2 3	5 3	4 3	8 6		
2	5 3	6 3	5 4	6 6	5 4	6 4	5 3	5 3	5 3	7 6		
3	5 4	6 4	5 4	7 4	5 4	6 4	4 3	5 3	6 4	8 6		
4	5 4	6 3	5 4	6 4	5 4	6 4	2 3	5 3	4 4	6 4		
5	5 4	6 3	5 4	6 4	5 4	3 4	4 3	5 3	3 3	6 4		
6	5 4	5 4	5 4	6 4	5 4	6 4	2 3	5 3	5 3	6 4		
7	5 4	5 3	5 4	5 4	5 4	6 4	5 3	2 3	5 3	6 5		
8	5 4	5 3	5 4	5 4	5 4	6 4	2 3	2 3	5 4	6 4		
9	5 3	4 3	5 4	5 4	5 4	5 3	5 3	2 3	4 4	6 5		
10	4 4	4 4	5 4	5 3	5 4	6 4	5 3	2 3	4 4	5 4		
11	3 4		5 4	5 3	5 4	6 4	5 3	2 3	5 4	5 4		
12			5 4									
13			6 4									
14			6 4									
15			6 4									
16			7 4									
17			5 6									
18			5 6									
19			6 4									
20			6 4									

[illegible]

ANHANG III: KOSTENRECHNUNG

Die folgende Zusammenstellung bezieht sich auf die Durchführung großflächiger Befliegungen zur Inventarisierung von Nematodenschäden in Zuckerrüben. Die Kosteneinheiten je Flugkilometer bzw. Luftbild wurden gemäß den Angaben von WINKELMANN (1978) veranschlagt.

Für die modellhaften Berechnungen seien die nachstehenden Gegebenheiten angenommen:

- das Gelände sei weitgehend eben;
- die zu befliegende Fläche sei zu 60 % landwirtschaftlich genutzt;
- die Felder im Befliegungsgebiet seien alle 3 Jahre einmal mit Zuckerrüben bestanden, d.h. nach 3 aufeinanderfolgenden Bildflugjahren sei jedes Feld einmal mit Zuckerrüben bestanden gewesen, wodurch eventuelle Nematodenschäden insgesamt erfaßt worden sind;
- das Befliegungsgebiet sei von rechteckiger Gestalt;
- die jährliche Zuckerrübenanbaufläche betrage 100 000 ha; d.h. die Gesamtanbaufläche beträgt 300 000 ha. Da das Gebiet zu 60 % landwirtschaftlich genutzt wird, liegen diese 300 000 ha in einer Gesamtfläche von 500 000 ha = 5 000 km²;
- diese Fläche sei ein Rechteck mit den Seitenlängen 80 und 62,5 km;
- die Luftaufnahmen sollen sich in Längsrichtung zu 20 % überlappen; die Seitüberdeckung betrage ebenfalls 20 %.

In Abb. 30 ist das Bildflugverfahren grob dargestellt.

Die Flugstreifen sollen in Längsrichtung des Rechtecks liegen. Bei einem Bildmaßstab von 1 : 10 000 entspricht die Bildseitenlänge einer Strecke von 2,3 km auf der Erdoberfläche.

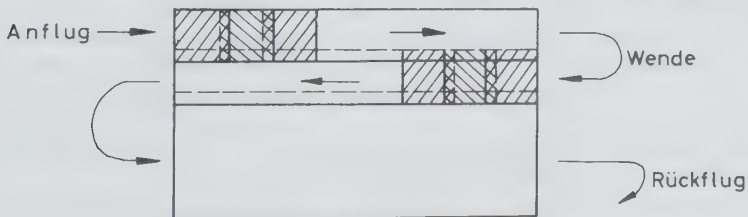


Abb. 30

Schematische Darstellung des Bildflugvorgangs

Nach $n_p = \frac{1_p}{b} + 1$, wobei n_p = Bildanzahl/Flugstreifen; 1_p = Länge des Flugstreifens; b = Aufnahmebasis sind bei 20 % Längsüberdeckung 45 Bilder in Längsrichtung aufzunehmen. Die Anzahl der Flugstreifen n_q bei 20 % Querüberdeckung errechnet sich nach $n_q = \frac{1_q - s' \cdot q_{mh}}{a} + 1$ (wobei s' = Bildseitenlänge und $a = b$ aus voriger Gleichung) als 35.

Die Befliegung der Gesamtfläche von 5 000 km² erfordert demnach 45 x 35 = 1 575 Aufnahmen.

Die Flugstrecke während der Befliegungen beträgt 35 x 80 = 2 800 km, dazu je Wende 2 km = 68 km, also insgesamt 2 868 km. Die An- und abflugstrecke vom Flugplatz zum Befliegungsgebiet und zurück soll 200 km betragen; für drei Flugtermine, die zur Gesamtflächen- deckung anzusetzen sind, werden somit 600 km berechnet. Es ergibt sich eine Gesamtflugstrecke von 3 468 km.

Kosten je Flugkilometer:	DM 10.-	= DM 34.680,--
Kosten je IRC-Luftbild:	DM 20.-	= DM 31.500,--

Summe der Befliegungskosten einer Befliegungs- kampagne	<u>DM 66.180,--</u>
Somit Kosten einer kompletten Befliegung (3 Jahre)	<u>DM 198.540,--</u>

Als zusätzliche Kosten sollen jährlich DM 15.000,-- veranschlagt werden. Sie beinhalten die einmalige Anschaffung von Hilfsgeräten zur Bildauswertung sowie als variable Kosten Geländestichproben, Interpretationshilfen etc.

Es ergibt sich somit eine Gesamtsumme von DM 243.540,--

Wird noch die einmalige Herstellung von Schwarzweiß-Kontaktabzügen zur Eintragung der Resultate einbezogen (1 Kontaktabzug = DM 4,-- = DM 6.300,--, woraus Kosten von DM 0,92 je ha resultieren), so sind bezogen auf 300 000 ha Zuckerrübenanbaufläche die Kosten für für Befliegung, Film und Entwicklung je Hektar DM 0,82.

Für die Berechnung der Interpretationskosten wird angenommen, daß der Auswerter 10 Aufnahmen/Tag interpretiert.

Auf diesen Aufnahmen sind 5 290 ha minus 40 % (Überdeckung) = 3 174 ha abgebildet; davon seien 60 % landwirtschaftliche Nutz- fläche = 1 904 ha, wovon wiederum 1/3 mit Zuckerrüben bebaut ist = 635 ha.

Als Personalkosten werden je Monat DM 4 600,-- veranschlagt, woraus sich bei 160 Arbeitsstunden ein Stundensatz von DM 28,75 ergibt.

Bei 8 h Arbeitszeit erhält man somit Kosten von DM 230,00/635 ha = DM 0,36/ha.

Für die Nutzung des Bildanalysators VP-8 sind bei einem Kaufpreis von 250 000,-- DM bei 10-jähriger Nutzung abzuschreiben:

	DM 25.000,--/Jahr
zuzüglich 2 % Servicefunktion	DM 5.000,--/Jahr
Betriebskosten (Annahme)	DM 2.000,--/Jahr
jährliche Kosten	DM 32.000,--/Jahr

Bei 1 000 Nutzungsstunden im Jahr errechnen sich die Kosten je Stunde als DM 32,--.

Bei der zusätzlichen Nutzung des VP-8 belaufen sich die Kosten damit auf DM 32,--/79,4 ha Std. = DM 0,40/...

Die einfachen Interpretationskosten inklusive Darstellung auf Schwarzweiß-Kontaktabzügen betragen je ha DM 0,38/ha

Die zusätzliche Darstellung mittels des Bildanalysators addiert ergibt gesamte Interpretationskosten von DM 0,78/ha

Damit ergeben sich als Gesamtkosten für Befliegung, Filmmaterial und Entwicklung, Fixkosten und Interpretation je Hektar DM 1,60

Zum Vergleich seien hier die Kosten für konventionelle Untersuchungsverfahren auf Nematodenbesatz zusammengestellt:

	Fenwick 1	Fenwick 2	Biotest
Anzahl Proben je ha	4	8	8
Kosten d. Probenahme/Probe	DM 2,50	DM 2,--	DM 2,--
kosten d. Probenahme/ha	DM 10,--	DM 16,--	DM 16,--
Untersuchungskosten/Probe	DM 10,--	DM 8,--	DM 3,--
Untersuchungskosten/ha	DM 40,--	DM 64,--	DM 24,--
Gesamtkosten/ha	DM 50,--	DM 80,--	DM 40,--

Mit dieser ausführlichen rechnerischen Darstellung konnten die ökonomischen Vorteile der erarbeiteten und auf ihre Tauglichkeit überprüften Verfahrenstechnik aufgezeigt werden. Bei der Befliegung kleinerer Areale als des hier vorgegebenen, erhöhen sich die Kosten je ha Rübenfläche. Nach den derzeitigen Kostenrichtlinien liegt der Gesamtaufwand bei Befliegungen von 50 km² Gesamtfläche oder mehr jedoch immer noch unter DM 10,- je ha.

LEBENS LAUF

Am 6. April 1950 wurde ich als Sohn des Erich Sanwald, Arbeiter und Landwirt, und seiner Ehefrau Marie-Luise, geb. Braun, in Hohebuch (Hohenlohe) geboren.

Von 1956 bis 1960 besuchte ich die Volksschule Grünbühl und anschließend das Gymnasium bei St. Michael zu Schwäbisch Hall, wo ich 1968 die Reifeprüfung ablegte.

Das im Wintersemester 1968/69 an der Universität Hohenheim begonnene Studium der Agrarbiologie schloß ich im Sommersemester 1972 mit der Diplom-Hauptprüfung ab.

Im Anschluß daran wurde mir vom Deutschen Akademischen Austauschdienst ein zweijähriges Stipendium zum Erlernen der chinesischen Sprache verliehen, das eine Grundschulung an der Universität Tübingen (Oktober 1972 bis Juni 1973) und einen Studienaufenthalt an der Nanyang-Universität und der Singapore University in Singapur beinhaltete.

Im November 1974 begann ich bei Herrn Professor Dr. W. Koch am Institut für Phytomedizin der Universität Hohenheim mit ersten Studien zu der vorliegenden Abhandlung.

Herr Professor Dr. G. Hildebrandt an der Abteilung Luftbildmessung und -interpretation des Instituts für Forsteinrichtung und forstliche Betriebswirtschaft der Universität Freiburg berief mich im Juni 1976 zur Bearbeitung eines Forschungsauftrages für zwei Jahre zu sich.

Während der Jahre 1976 bis 1978 war ich für die Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit mehrfach als Kurzzeitexperte in außereuropäischen Pflanzenschutzprojekten tätig. Seit Juli 1978 arbeite ich wiederum an der Abteilung Herbologie des Instituts für Phytomedizin der Universität Hohenheim.

Die erste Aufgabe der Verwaltung ist es, die
 Wirtschaft der Gemeinde zu ordnen und zu
 leiten. Sie muss die Einnahmen und Ausgaben
 der Gemeinde verwalten und die Steuern
 einheben. Sie muss auch die öffentlichen
 Arbeiten der Gemeinde organisieren und
 durchführen. Die Verwaltung muss die
 Interessen der Gemeinde vertreten und
 die Rechte der Bürger schützen.

Die Verwaltung ist diejenige, die die
 öffentlichen Angelegenheiten der Gemeinde
 verwaltet. Sie ist diejenige, die die
 Steuern einhebt und die Ausgaben der
 Gemeinde verwaltet.

Die Verwaltung ist diejenige, die die
 öffentlichen Angelegenheiten der Gemeinde
 verwaltet. Sie ist diejenige, die die
 Steuern einhebt und die Ausgaben der
 Gemeinde verwaltet. Sie ist diejenige,
 die die öffentlichen Arbeiten der Gemeinde
 organisieren und durchführen muss.

Die Verwaltung ist diejenige, die die
 öffentlichen Angelegenheiten der Gemeinde
 verwaltet. Sie ist diejenige, die die
 Steuern einhebt und die Ausgaben der
 Gemeinde verwaltet.

Die Verwaltung ist diejenige, die die
 öffentlichen Angelegenheiten der Gemeinde
 verwaltet. Sie ist diejenige, die die
 Steuern einhebt und die Ausgaben der
 Gemeinde verwaltet. Sie ist diejenige,
 die die öffentlichen Arbeiten der Gemeinde
 organisieren und durchführen muss.

Die Verwaltung ist diejenige, die die
 öffentlichen Angelegenheiten der Gemeinde
 verwaltet. Sie ist diejenige, die die
 Steuern einhebt und die Ausgaben der
 Gemeinde verwaltet. Sie ist diejenige,
 die die öffentlichen Arbeiten der Gemeinde
 organisieren und durchführen muss.

